А.А. Дайлидко

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

А. А. Дайлидко

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Утверждено Департаментом кадров
и учебных заведений МПС России
в качестве учебника для студентов техникумов
и колледжей железнодорожного транспорта

Москва
2000

УДК 629.423.31:621.313
ББК 39.232
Д14

Дайлидко А.А.
Электрические машины тягового подвижного состава: Учебн. для колледжей ж.-д. транспорта — М. : Желдориздат, 2000. — 404 с.

ISBN 5-94069-006-8

Рассмотрены особенности условий работы тяговых электрических машин и трансформаторов, требования, предъявляемые к ним в эксплуатации. Даны основные положения теории и конструкции тяговых машин и трансформаторов.

Книга предназначена в качестве учебника для студентов колледжей железнодорожного транспорта специальности «Техническая эксплуатация, обслуживание и ремонт подвижного состава». Может быть полезна инженерам и техникам локомотивного хозяйства, а также локомотивным и бригадам.

Рецензенты: А.М. Кривной, А.А. Баженов, В.Н. Лапицкий

ISBN 5-94069-006-8

Введение

Современный этап развития человеческой цивилизации немыслим без применения электрической энергии. Невозможно назвать отрасль промышленности, транспорта, сельского хозяйства, быта людей, где бы не применялось электричество.

Непосредственное преобразование химической, тепловой или ядерной энергии в электрическую на современном этапе используется в очень ограниченном масштабе.

Это преобразование требует больших капитальных затрат и сопряжено с большими энергетическими потерями. Поэтому все виды энергии предварительно преобразуются в механическую и после этого в электрическую энергию. *Электрические машины преобразуют механическую энергию в электрическую и электрическую в механическую, а также одну форму электрической энергии в другую, отличающихся по напряжению, току, частоте.*

Электрическая машина, в отличие от других электромеханических преобразователей, совершает непрерывное преобразование энергии.

Генератором называют электрическую машину, преобразующую механическую энергию в электрическую. Двигателем называют электрическую машину, преобразующую электрическую энергию в механическую.

Началом создания электрических машин следует считать открытие М. Фарадеем закона электромагнитной индукции и последующие работы в этой области Д. Максвелла и Э. Ленца.

Благодаря исследованиям этих ученых в середине XIX столетия появились первые образцы электрических машин и трансформаторов.

Первую модель магнитоэлектрического синхронного генератора построил вскоре после откриития М. Фарадеем закона электромагнитной индукции неизвестный автор, скрывший свое имя под инициалами П.М. Это положило начало развитию синхронных генераторов переменного тока с постоянными магнитами.

Создавая электродвигатели многие ученые и изобретатели стремились повторить схему паровой машины с возвратно-поступательным движением. В качестве примера можно привести электродвигатель профессора Ч. Пэйджа (рис. В.1). Эта

машина развивала мощность 16 л.с. (11,776 кВт) и была поставлена на локомотив. Двигатель позволил развить скорость до 30 км/час. Так было положено начало электрической тяге.

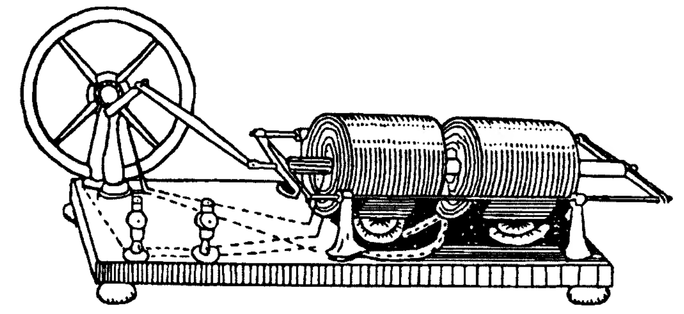


Рис. В.1. Модель электродвигателя Ч. Педжа с возвратно-поступательным движением

Русский ученый Б.С.Якоби в 1834 году создал многополюсный электродвигатель (рис. В.2) с вращательным движением якоря, который послужил прототипом современного коллектора.

В дальнейшем были разработаны более совершенные образцы электрических машин. Большой вклад в развитие электромаши-

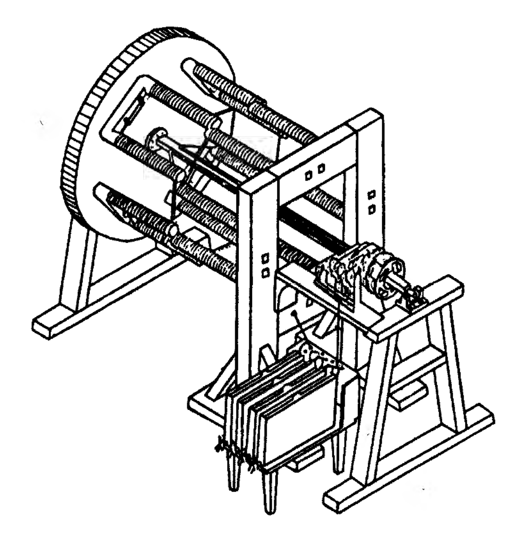


Рис. В.2. Двигатель Б.С. Якоби с вращательным движением

ностроения внесли зарубежные ученые В. Сименс, Пачинотти, Т. Эдисон, Е. Арнольд, Н. Тесла и русские ученые П.Я. Яблочков, М.О. Доливо-Добровольский, А.Е. Алексеев, Б.П. Апаров, А.И. Важнов, А.И. Вольдек, Ф.И. Горянинов, А.А. Горов, В.Т. Касьянов, М.П. Костенко, К.А. Круг и др.

Современный железнодорожный транспорт немыслим без применения электроэнергетики. На рис. В.3 показана схема электроснабжения электрифицированной железной дороги. На электростанции (гидравлической, тепловой или атомной) электрические машины — генераторы вырабатывают трехфазный ток промышленной частоты, который поступает на повышающую подстанцию. Трансформатором повышающей подстанции напряжение повышается (до 220, 110 или 35 кВ) и подается в линию электропередачи (ЛЭП). От ЛЭП электроэнергия поступает на тяговую подстанцию. На подстанции напряжение снижается до величины, установленной в контактной сети: на постоянном токе — 3 кВ, на переменном токе — 25 кВ. На тяговых подстанциях постоянного тока осуществляется преобразование переменного тока в постоянный при помощи выпрямительных установок. На тяговых подстанциях, также как и на

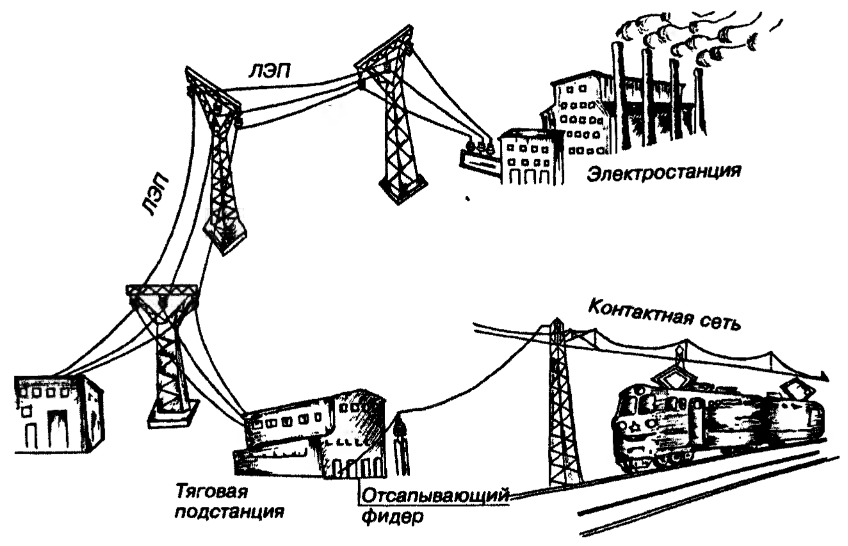


Рис. В.3. Схема питания электрофицированных железных дорог

повышающих подстанциях электростанций установлены трансформаторы (аппараты, в которых протекают те же процессы, что и у электрических машин).

От подстанций ток подается в контактную сеть и через токоприемники, пускорегулирующую аппаратуру — к тяговым двигателям электровоза. Благодаря тяговым двигателям осуществляется движение электровоза.

На тепловозах с электрической передачей дизель приводит во вращение тяговый генератор, который через пускорегулирующую аппаратуру питает тяговые двигатели.

Материалы, применяемые в электромашиностроении, подразделяют на три категории: конструктивные, активные и изоляционные. Конструктивные материалы применяют для изготовления частей и деталей машины, воспринимающих и передающих механические нагрузки (валы, станины, подшипниковые щиты и стояки, различные крепежные детали и т.д.). В качестве конструктивных материалов применяют сталь, чугун, цветные металлы и их сплавы, а также пластмассы.

Активные метериалы бывают двух видов: проводниковые и магнитные.

В качестве проводниковых материалов используют медь и рафинированный алюминий. Медь, применяемая в качестве электрических проводников, не должна содержать больше 0,1% примесей. Очень вредное воздействие оказывают на электропроводимость примеси висмута и сурьмы.

Медные сплавы используют для изготовления вспомогательных токоведущих частей (контактные кольца, коллекторные пластины, болты и т.д.). Алюминий имеет большее удельное сопротивление чем медь, поэтому габаритные размеры электрических машин с алюминиевыми обмотками получаются больше чем с медными, т.к. требуется большее сечение проводников, а это ведет к увеличению пазов якоря, габаритов обмоток возбуждения и т.д.

В качестве магнитопроводов используют различные ферромагнитные материалы: электротехническую сталь, чугун, стальное литье, листовую и кованную сталь, специальные стальные сплавы.

Физические свойства и сортамент электротехнической стали регламентированы ГОСТ 21427.0-75.В электрических машинах

применяют электротехнические стали марок 1211, 1212, 1213, 1311, 1312, 1411, 1412, 1511, 1512, 3411, 3413. Здесь первая цифра обозначает класс стали по структурному состоянию и виду прокатки: 1— горячекатанная изотропная; 2 — холоднокатанная изотропная; 3 — холоднокатанная анизотропная с ребровой структурой. Вторая цифра показывает содержание кремния. При цифре 2 содержание кремния 0,8–1,8%; при цифре 3 — 1,8–2,8%; при цифре 4 — 2,8–3,8%; при цифре 5 — 3,8–4,8%. Третья цифра указывает группу по основной нормируемой характеристике: 0 — удельные потери при магнитной индукции B = 1,7 Т и частоте 50 Гц, 1 — удельные потери при B = 1,5 Т и частоте 50 Гц, 2 — удельные потери при B = 1,0 Т и частоте 400 Гц, 6 — магнитная индукция в слабых полях при напряженности поля 10 А/м. Четвертая цифра порядковый номер.

При увеличении кремния ухудшаются механические свойства стали, т.к. увеличивается ее хрупкость. В то же время кремний улучшает магнитные свойства. Во-первых, он способствует переводу имеющегося в стали углерода из цементита в графит, что способствует снижению потерь на гистерезис, и, во-вторых увеличивает электрическое сопротивление стали, что уменьшает потери на вихревые токи.

Обычно применяют листовую электротехническую сталь толщиной 0,5 и 0,35 мм, а также в виде ленты, намотанной в рулоны.

По способу обработки различают горячекатанную и холоднокатанную сталь. Горячекатанная сталь имеет одинаковое магнитное сопротивление во всех направлениях прокатки. Холоднокатанная сталь имеет меньшее магнитное сопротивление вдоль направления прокатки.

Изоляционные материалы, применяемые для изоляции токоведущих частей электрических машин, могут быть твердыми, жидкими и газообразными. Газообразными считают воздух и водород, которые являются изоляторами и в то же время охлаждают узлы и детали электрических машин. В качестве жидких диэлектриков применяют трансформаторное масло, хорошо охлаждающее мощные трансформаторы. Твердые изоляционные материалы можно условно разделить на четыре группы:

а) естественные органические волокнистые материалы —

шелк, хлопчатая бумага, материалы на основе древесной целлюлозы;

б) неорганические материалы — слюда, стекловолокно, асбест;

в) различные синтетические материалы в виде смол, пленок, листового материала и т.д.;

г) различные эмали, лаки и компауды на основе природных и синтетических материалов.

Международные и отечественные стандарты классифицируют изоляционные материалы на семь классов со следующими предельно допустимыми температурами:

Класс изоляции	*Y*	*A*	*E*	*B*	*F*	*H*	*C*
Предельно-допустимая температура	90	105	120	130	155	180	более 180

Свойства изоляционных, конструктивных и проводниковых материалов подробно рассматриваются в курсе «Материаловедения». Курс «Электрические машины ТПС» тесно увязан с такими дисциплинами как «Теоретические основы электротехники», «Техническая механика». В процессе изучения тяговых машин необходимы знания условных обозначений, применяемых в электрических схемах и умение чтения чертежей. Это обеспечивает такая дисциплина как «Инженерная графика».

Курс «Электрические машины ТПС» является базой для изучения таких дисциплин как « Конструкция ТПС», «Электрические аппараты и цепи», «Технология ремонта ТПС», «Основы локомотивной тяги».

Контрольные вопросы

1. Каково назначение электрических машин?
2. Какие виды материалов применяют при изготовлении электрических машин?
3. Для чего нужны конструкционные материалы?
4. Назовите конструкционные материалы, применяемые в электрических машинах.
5. По каким признакам поразделяют изоляционные материалы?
6. Каким элементом легируют электротехнические стали?

Раздел 1.
Электрические машины постоянного тока

Глава 1.
Принцип действия и устройство машин постоянного тока

1.1. Принцип действия машин постоянного тока

Преобразование энергии в электрических машинах происходит по закону электромагнитной индукции.

Если проводник, длиной l (рис. 1.1), помещенный в магнитное поле, перемещать перпендикулярно вектору магнитной индукции B с некоторой скоростью v, то в проводнике будет индуктироваться электродвижущая сила (ЭДС) $E_{пр}$

$$E_{пр} = Blv. \qquad (1.1)$$

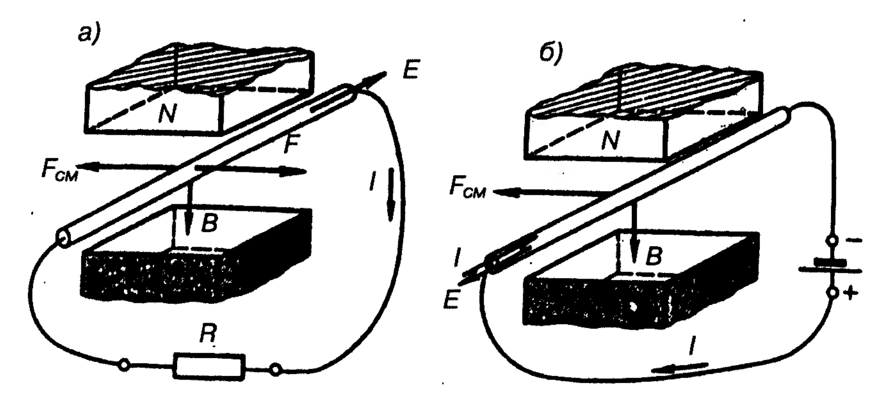


Рис. 1.1. К понятиям об "элементарном генераторе" (а) и "элементарном двигателе" (б)

Направление ЭДС определяют правилом «правой руки» (рис. 1.2, *а*). *Правую руку надо расположить так, чтобы магнитные силовые линии были направлены перпендикулярно ладони, а отогнутый на 90° большой палец был направлен по вектору скорости, тогда четыре вытянутых пальца покажут направление ЭДС.*

Если вместо проводника взять виток (рис. 1.3), присоединить его концы к контактным кольцам и вращать в магнитном поле,

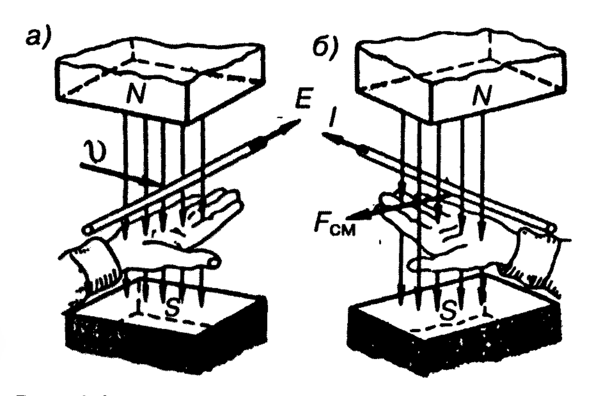


Рис. 1.2. Правила "правой руки" и "левой руки"

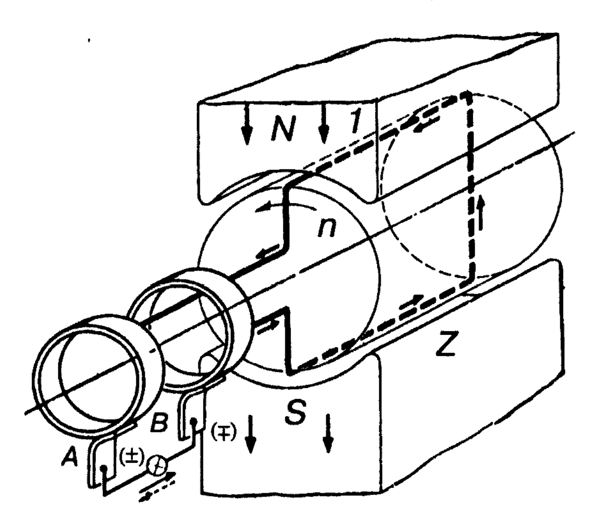


Рис. 1.3. Схема работы машины переменного тока

то в обоих проводниках вследствие симметрии индуктируются одинаковые ЭДС, которые по контуру витка будут складывают, и поэтому полная ЭДС витка $E_{витка}$ равна

$$E_{витка}=2e_{пр}=2Blv. \quad (1.2)$$

ЭДС витка будет переменной, так как стороны витка проходят попеременно под северным и южным полюсами, в итоге направление ЭДС в проводниках меняется. Форма кривой ЭДС повторяет форму кривой магнитной индукции в воздушном зазоре (рис. 1.4). Если виток с помощью щеток замкнуть через внешнее сопротивление, например, лампочку, то образуется замкнутая цепь, по которой потечет ток I_a.

Если кольца разрезать на полукольца и сдвинуть их, то образуются две коллекторные пластины (рис. 1.5). При повороте витка и коллектора на 90^0 и изменении направления ЭДС в проводниках — происходит смена коллекторных пластин под щетками. Вследствии этого под верхней щеткой всегда будет находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным полюсом, а под нижней — пластина соединенная с проводником, расположенным южным под полюсом. В результате этого полярность щеток и направление тока во внешней цепи остается неизменным. Таким образом два полукольца выпрямляют переменный ток в постоянный во внешней цепи. Если взять не один виток, а несколько, то

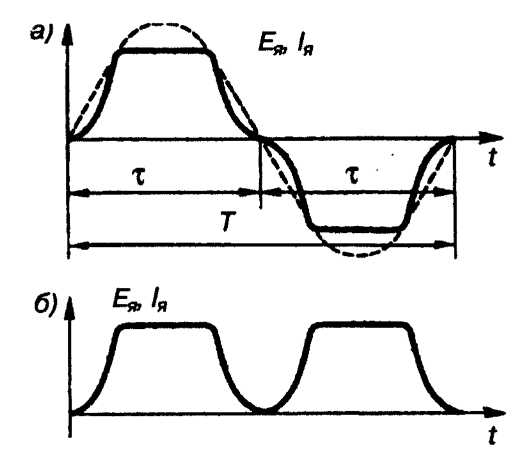


Рис. 1.4. Кривые ЭДС ($E_я$) и тока ($I_я$) простейшей машины в зависимости от времени t:

а — переменного тока;
в — постоянного тока
(штриховая кривая — синусоида)

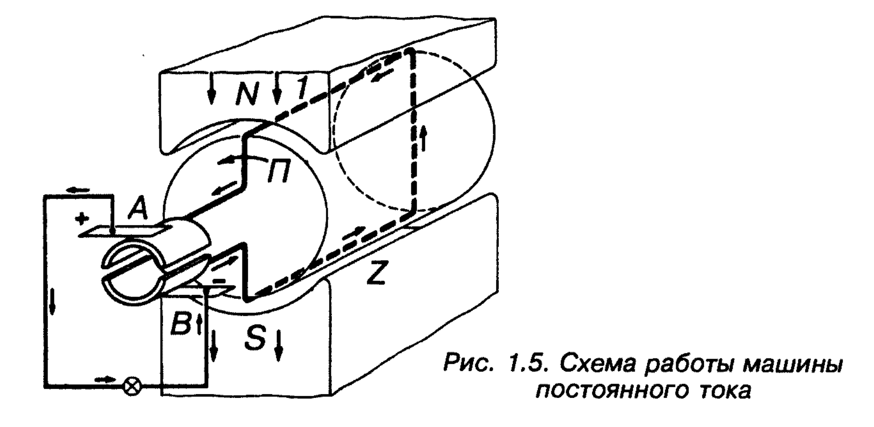


Рис. 1.5. Схема работы машины постоянного тока

образуется обмотка якоря, а полукольца превратятся в коллектор.

Рассматриваемая простейшая машина может работать двигателем. На рис. 1.6, *а* показано магнитное поле двух главных полюсов; а на рис. 1.6, *б* — магнитное поле проводника с током. Направление магнитных силовых линий данного проводника определяют *правилом буравчика.* Если этот проводник с током внести в магнитное поле главных полюсов, то магнитные поля главных полюсов и проводника с током будут между собой взаимодействовать. На рис. 1.6, *в* показано результирующее магнитное поле. С одной стороны проводника — разрежение магнитных силовых линий, а с другой — сгущенность. Магнитные силовые линиии можно условно рассматривать как пружины, которые выталкивают проводник с током.

Величина выталкивающей силы определяют по формуле

$$f = BLi, \qquad (1.3)$$

где f — величина выталкивающей силы, Н
B — магнитная индукция, Т
L — длина проводника, м
i — величина тока, протекающего по проводнику, А.

Направление выталкивающей силы определяют по *правилу «левой руки»* (рис. 1.2, *б*). *Руку надо расположить так, чтобы магнитные силовые линии входили в ладонь, четыре вытянутых*

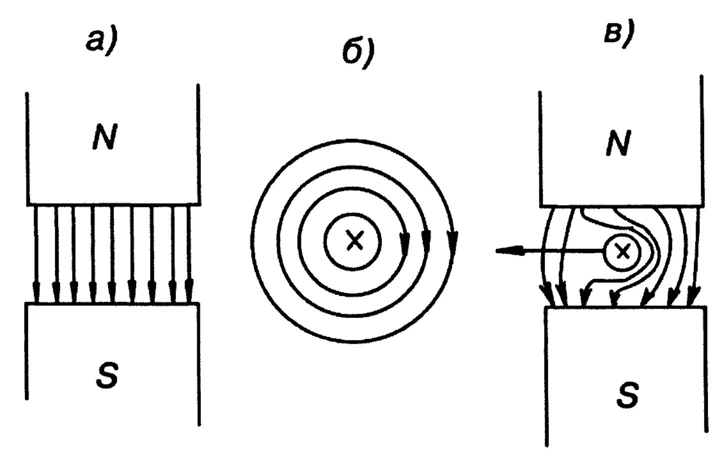


Рис. 1.6. Взаимодействие проводника с током и магнитного поля полюсов

пальца направляют вдоль проводника по направлению тока, тогда отогнутый на 90° большой палец покажет направление выталкивающей силы. После поворота на 180° электромагнитные силы не изменят своего направления, так как одновременно с переходом каждой стороны витка из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока.

1.2. Устройство машины постоянного тока

Машина постоянного тока (рис. 1.7) состоит из двух основных частей: неподвижной части — статора, вращающейся части — ротора. Неподвижная и вращающаяся части отделены друг от друга воздушным зазором (рис. 1.8).

Статор состоит из станины *6*, главных полюсов *4* с полюсными катушками *5*, переднего подшипникового щита *13*, заднего подшипникового щита *7*, щеткодержателей *15* со щетками *2*. Станина опирается на фундамент посредством лап *12*.

Ротор состоит из вала *10*, сердечника *3* с обмоткой *9*, коллектора *1*, подшипников *14*.

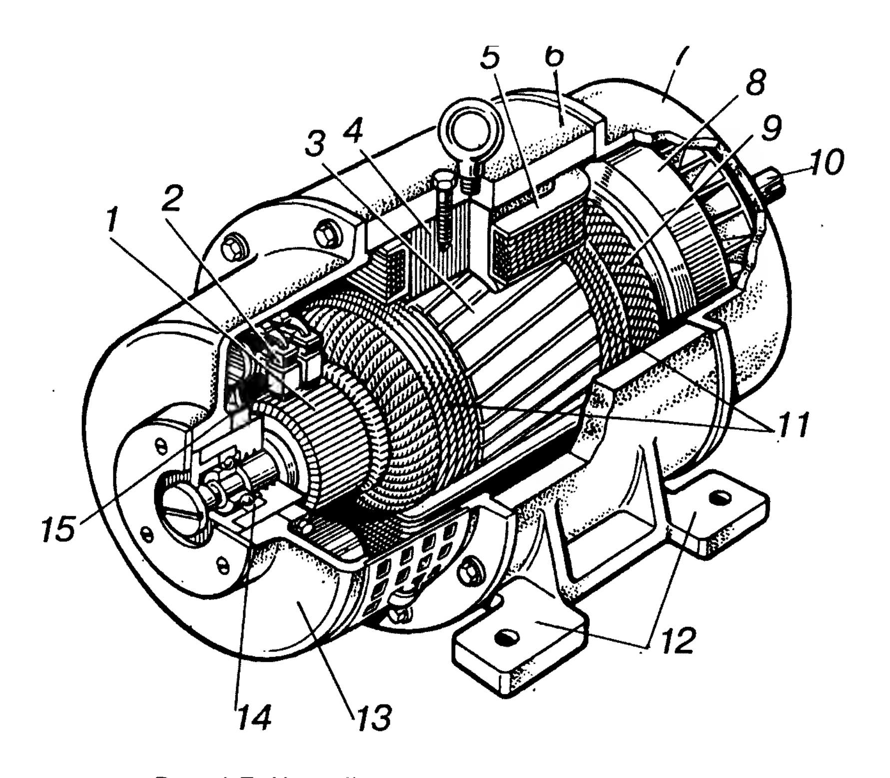


Рис. 1.7. Устройство машины постоянного тока:

1 — коллектор; 2 — щетка; 3 — якорь; 4 — главный полюс; 5 — катушка возбуждения; 6 — станина; 7 — задний подшипниковый щит; 8 — вентилятор; 9 — задние лобовые части обмотки якоря; 10 — вал; 11 — бандажи; 12 — лапы; 13 — передний подшипниковый щит; 14 — подшипник; 15 — щеткодержатель

Станина с главными полюсами образуют магнитную систему машины. Которую называют индуктором. Станину изготовляют из ферромагнитного материала — обычно стали — материала обладающего прочностью и магнитной проницаемостью. В машинах малой и средней мощности станину делают из стальной трубы, а в машинах большой мощности применяют стальное литье, например,в тяговых двигателях локомотивов, а также используют сварные станины из толстолистовой стали (тяговый генератор тепловоза).

Главные полюсы с обмотками возбуждения (рис. 1.8) предназначены для создания основного магнитного потока. Состоят из сердечника полюса *2*, изготовленного из отдельных листов электротехнической стали и обмотки возбуждения *3*. В некоторых машинах ТПС, например, возбудитель и вспомогательный генератор тепловоза, сердечники главных полюсов изготовляют из листововой конструкционной стали Ст. 2. Пластины обычно не изолируют,так как оксидная пленка на поверхности листов уменьшает вихревые токи. Сердечник полюса стягивают шпильками *5*, концы которых расклепывают. Нижнюю, уширенную, часть сердечника *6* называют полюсным наконечником или башмаком. Катушки возбуждения опираются на заплечики *4* полюса. Катушки всех полюсов обычно соединяют последовательно. В машинах малой мощности полюсные катушки делают бескаркасными (рис. 1.*8*, *а*). В этом случае обмоточный провод наматывают на сердечник полюса, предварительно наложив изоляционную прокладку. В тяговых машинах ТПС обмотку возбуждения часто наматывают на пластмассовый каркас, а затем надевают на сердечник полюса. На возбуждение затрачивается мощность, составляющая 0,5–3% от наминальной мощности машины.

Между главными полюсами, в машинах мощностью более 0,5 кВт устанавливают добавочные полюса, улучшающие условия токосъема (об этом подробнее см. в гл. 3).

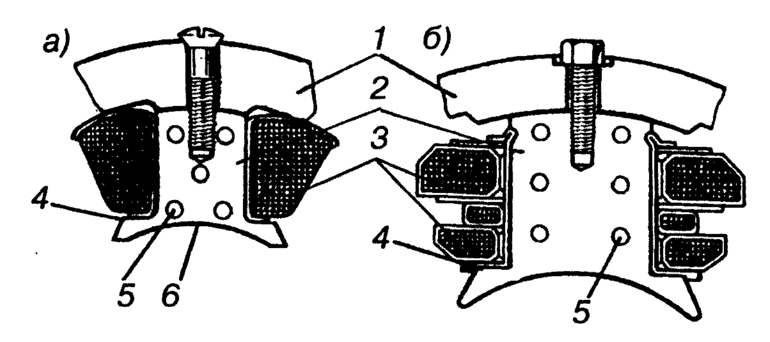


Рис. 1.8. Главные полюса с бескаркасной (а) и каркасной (б) полюсными катушками:

1 — станина; 2 — сердечник полюса; 3 — полюсная катушка; 4 — заплечики; 5 — шпильки или заклейки; 6 — башмак

Главные и добавочные полюсы крепят к станине при помощи болтов.

Якорем называют часть электрической машины в обмотках которой индуктируется ЭДС. В машинах постоянного тока ЭДС индуктируется в обмотках ротора. Поэтому ротор машины постоянного тока называют якорем. Сердечник якоря выполняют из отдельных листов электротехнической стали, выполненных в виде дисков (рис. 1.9, *а*). Диски насаживают либо непосредственно на вал (при диаметре якоря $D_а < 75$ см), либо набирают на якорную втулку ($D_а > 40$ см), которую надевают на вал. Сердечник якоря диаметром 100 см и выше (якорь тягового генератора постоянного тока тепловоза) составляют из штампованых сегментов (рис. 1.9, *б*).

В листах штампуют отверстия для вентиляции. В пазы якоря укладывают обмотку. Ее обычно выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами закрывают клиньями, выполненными из текстолита или гетинакса. Лобовые части обмотки якоря *9* крепят бандажом *11* (рис. 1.7). Бандаж может быть проволочным, но в тяговых машинах его чаще всего выполняют из стеклоленты.

Может возникнуть вопрос: почему же в машине постоянного тока якорь и главные полюсы делают шихтованными? Ведь из курса электротехники известно, что вихревые токи возникают лишь в том случае, если магнитный поток будет переменным или пульсирующим. Рассмотрим участок электрической машины, включающий воздушный зазор и части главного

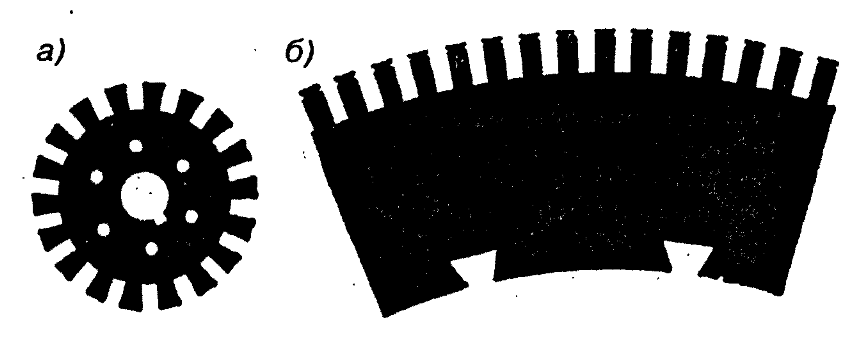


Рис. 1.9. Диск (а) и сегмент (б) стали якоря

полюса и якоря (рис. 1.10). При вращении якоря магнитная силовая линия попадает то в его паз,то в зубец. Из курса физики известно, что магнитная проницаемость воздуха, примерно, в 1000 раз меньше магнитной проницаемости стали. Происходит изменение магнитного сопротивления, а это приводит к пульсации магнитного потока, что вызовет появление вихревых токов. Вихревые токи нагревают машину, что вредно для ее изоляции и снижают ее К.П.Д. Вледствии этого якорь и главные полюсы делают шихтованными.

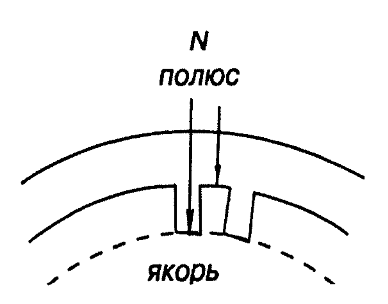


Рис. 1.10. Изменения длины магнитной силовой линии в пазу якоря

Обмотку якоря присоединяют к *коллектору*, который имеет различное исполнение в зависимости от мощности, быстроходности и других факторов. На рис. 1.11 показан коллектор машины небольшой мощности. Пластины *1* коллектора изготовляют из твердотянутой меди, толщиной 3–15 мм, изолированные друг от друга миканитовыми прокладками. Нижняя часть коллекторных пластин имеет форму «ласточкина хвоста». Стальные нажимные фланцы *4*, через миканитовые манжеты *2*, зажимают нижнюю часть коллекторных пластин («ласточкин хвост») посредством

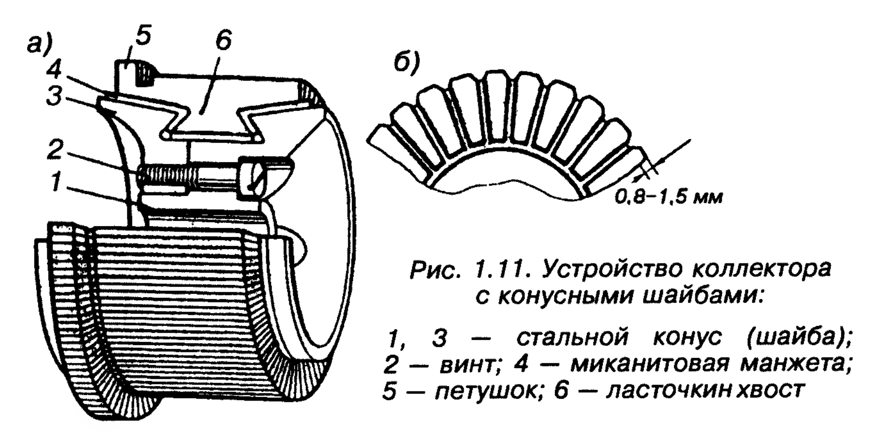


Рис. 1.11. Устройство коллектора с конусными шайбами:

1, 3 — стальной конус (шайба); 2 — винт; 4 — миканитовая манжета; 5 — петушок; 6 — ласточкин хвост

шпильки *7*. Собранный коллектор крепится на валу *6* с помощью шпонки *5*. Верхняя часть *3* коллекторных пластин, которую называют «петушком», имеет узкий продольный паз, куда закладывают проводники якоря и тщательно пропаивают. Некоторые вспомогательные машины ТПС, например, вспомогательный генератор тепловозов 2ТЭ10В, 2М62 и др., снабжены коллектором на пластмассе. Такой вид коллектора неразборный. Коллекторные пластины при сборке вдавливают в разогретую пластмассу. При застывании пластмассы создается монолитное соединение.

Для отвода тока от вращающегося коллектора, а также и подвода к нему тока применяют щеточные аппараты. Щеткодержатель (рис. 1.12) укрепляют на щеточных пальцах с помощью зажимов *5*. На одном пальце может быть несколько щеткодержателей. Щетку *3* помещают в обойму *4*. На щетку давит курок *1* посредством пружины *2*. Щетка снабжена медным тросиком (шунтом) *6*. Если бы шунт отсутствовал, то подвод тока осуществлялся б через пружину, что вызвало бы ее нагрев и потерю ее упругих свойств. Щеткодержатели крепят или к корпусу машины или к специальной траверсе, которую можно поворачивать, что очень удобно для осмотра и замены изношенных щеток. Давление на щетку можно регулировать посредством винтов *7*. Недостаточный нажим на щетку вызывает ее искрение, а чрезмерный — износ щетки и перегрев коллектора.

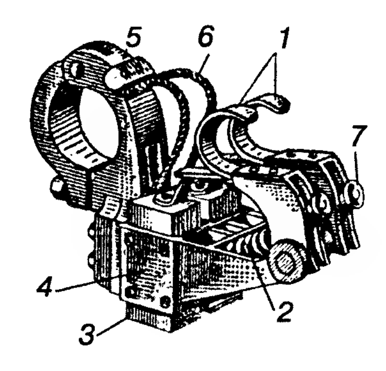


Рис. 1.12. Щеткодержатель (сдвоенный) машины постоянного тока:

1 — курок; 2 — пружина; 3 — щетка; 4 — обойма; 5 — зажим; 6 — гибкий (медный шунт) тросик; 7 — винт

Вентилятор служит для охлаждения машины. Его напрессовывают на вал якоря.

С торцов машина закрыта подшипниковыми щитами: передним *13* и задним *7* (рис 1.7). Концы обмоток выведены на зажимы клеммной коробки.

Контрольные вопросы

1. Как определить направление индуцированной ЭДС в проводнике?
2. От каких параметров зависит величина ЭДС, индуцированная в проводнике обмотки якоря ?
3. Как определить направление выталкивающей силы, возникающей в проводнике с током, помещенным в магнитное поле?
4. Какую функцию выполняет коллектор в генераторе постоянного тока?
5. Почему возникают вихревые токи в сердечниках якоря и главных полюсов?
6. Перечислите части машины, относящиеся к ротору.
7. Перечислите части машины, относящиеся к статору.

Глава 2.

Обмотки якоря машин постоянного тока

2.1. Общие сведения

В обмотках якоря происходит процесс преобразования энергии одного вида в другой. Основным элементом обмотки является *секция.* Секция может иметь один виток (рис. 2.1, *а*), два (рис. 2.1, *б*) и более (рис. 2.1, *в*) витков. Ширину секций выбирают таким образом, чтобы стороны секций распологались под полюсами разной полярности.Тогда ЭДС, индуктированная в сторонах секции, будет суммироваться. Это возможно только в том случае, если ширина секции равна полюсному делению. *Полюсным делением* τ называют часть окружности якоря, приходящуюся на один полюс.

$$\tau = \pi D_а / 2p, \tag{2.1}$$

где $D_а$ — диаметр якоря;

p — число пар полюсов.

Обмотки якоря обычно выполняют двухслойными. Одну сторону секции распологают в верхней части паза, а другую в — нижней. Благодаря этому индуктивность всех секций будет одинаковой. Верхняя пазовая сторона одной секции и нижняя пазовая сторона другой секции, лежащие в одном пазу, образуют *элементарный паз.* В одном реальном пазу может быть несколько элементарных пазов $u_п$ (рис. 2.2, *а*, *б*, *в*). На схемах обмоток стороны секций, находящихся в верхнем слое,

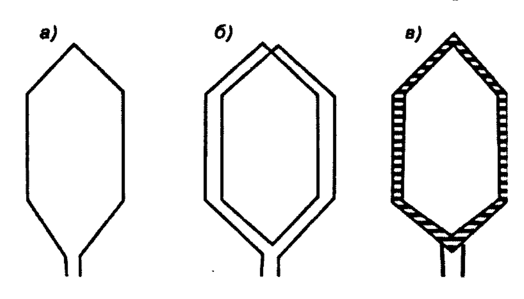


Рис. 2.1. Секции якоря

изображают сплошными линиями, а стороны, расположенные в нижнем слое, — штриховыми линиями. Общее число пластин коллектора K равно числу секций S и числу элементарных пазов $Z_э$

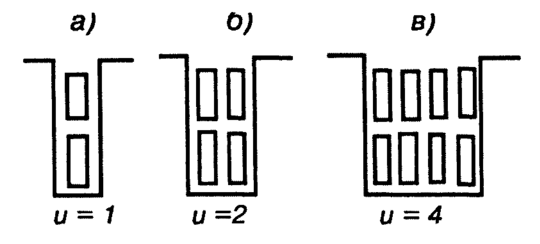


Рис. 2.2. Пазы якоря

$$K = S = Z_э \, . \tag{2.2}$$

Обмотки якоря бывают следующих видов: простая петлевая; простая волновая; сложная петлевая; сложная волновая; комбинированная.

2.2. Простая петлевая обмотка

Каждая секция в простой петлевой обмотке присоединена к двум рядом расположенным коллекторным пластинам. На рис. 2.3 представлены два возможных варианта укладки секций простой петлевой обмотки: правоходовая и левоходовая. Если укладывают секции слева направо, то обмотку называют правоходовой (рис. 2.3, *а*), а если наоборот, *левоходовой* (рис. 2.3, *б*).

Обмотка характеризуется следующими параметрами: y_1 — первый частичный шаг по якорю; y_2 — второй частичный шаг по якорю; y — результирующий шаг.

Если $y_1 = \tau$, то получаем обмотку с нормальным шагом. При

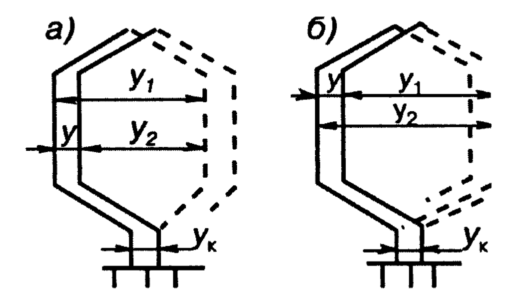


Рис. 2.3. Шаги обмотки якоря

$y_1 < \tau$ имеем обмотку якоря с укороченным шагом, и при $y_1 > \tau$ — с удлиненным шагом. Первый частичный шаг рассчитывают по формуле

$$y_1 = (Z/2p) \pm \varepsilon, \qquad (2.3)$$

где ε — некоторая величина, меньшая единицы, вычитая или суммируя которую получают значение шага y_1, равное целому числу.

Результирующий шаг $y = \pm 1$. Знак « + » относят к правоходовой обмотке, а минус « – » — к левоходовой.

Второй частичный шаг по якорю

$$y_2 = y_1 - y = y_1 - 1. \qquad (2.4)$$

Расстояние между двумя коллекторными пластинами, к которым присоединены начало и конец секции, *называют шагом обмотки по коллектору* $y_к = y$.

Шаги по якорю выражают в элементарных пазах.

В качестве примера рассмотрим построение простой петлевой обмотки для четырехполюсной машины ($2p = 4$) постоянного тока. Обмотка правоходовая и содержит 16 секций. Определим первый частичный шаг

$$y_1 = 16 / 4 = 4 \text{ паза}$$

Второй частичный шаг

$$y_2 = 4 - 1 = 3 \text{ паза}$$

Вначале на лист бумаги наносим и нумеруем пазы со сторонами секций, причем стороны секций, расположенные в верхней части паза изображаем сплошными линиями, а в нижней — штриховыми. После этого наносим контуры полюсов (рис. 2.4). При этом нужно иметь в виду, что изображаем не сам полюс, а его проекцию. Ниже строим коллекторные пластины и тоже нумеруем. Номер коллекторной пластине присваиваем тот же, что и стороне, лежащей в верхней части паза. Затем наносим контур первой секции. Начало присоединено к первой коллекторной пластине, а конец — ко второй. Ее ширина равна первому частичному шагу, т.е. четырем. Далее наносим контур второй секции и т.д. Последняя секция *16* замыкает обмотку.

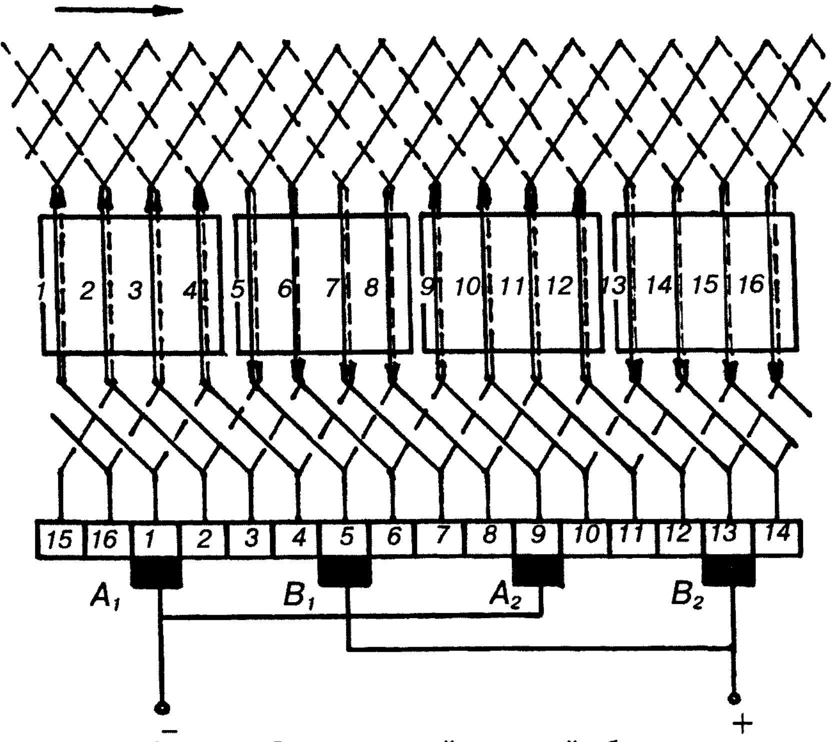


Рис. 2.4. Схема простой петлевой обмотки

Задаем направление вращения якоря (в любом направлении). Затем по правилу правой руки определяем направление ЭДС и указываем стрелками на сторонах секций.

При обходе обмотки по схеме можно установить, что для рассматриваемого положения якоря коллекторные пластины *1,5, 9, 13* являются узловыми точками, к которым присоединены секции, имеющие встречное направление ЭДС. Эти коллекторные пластины делят всю обмотку на участки с одинаковым направлением ЭДС в секциях. Если на эти пластины установить щетки, то щетки *А1* и *А2*, с которых поступает ток во внешнюю сеть, считают положительными, а щетки *В1* и *В2* — отрицательными. Действительно, из электротехники известно, что за положительное направление принято направление от «плюса» к

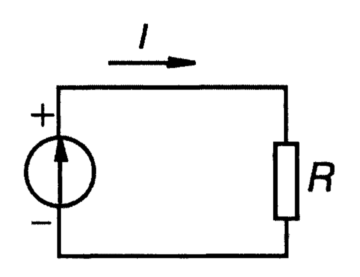


Рис. 2.5. Ток в электрической цепи

«минусу». Но это во внешней сети. А в генераторе ток будет протекать от «минуса» к «плюсу» (рис. 2.5). Щетки одинаковой палярности соединяем между собой параллельно.

2.3. Простая волновая обмотка

Простую волновую (последовательную) обмотку якоря получают при последовательном соединении секций, находящихся под разными полюсами. Последовательно обходя секции мы совершаем волнообразный обход по якорю и заканчиваем его на коллекторной пластине, находящейся слева или справа от исходной. В первом случае получаем неперекрещенную обмотку (рис. 2.6), а во втором — перекрещенную (рис. 2.7). Для перекрещенной требуется большой расход обмоточного провода. За один обход по якорю последовательно соединяют столько секций, сколько пар полюсов имеет машина. Затем делают второй, третий и все последующие обходы, пока не будут все секции обмотки соеденены между собой.

Первый частичный шаг определяют по формуле:

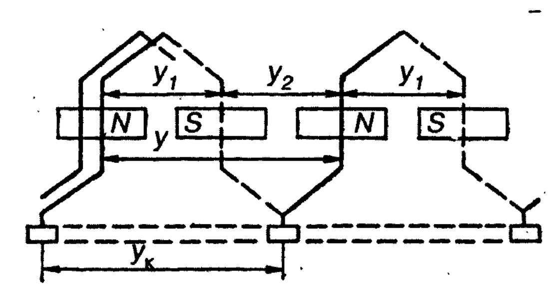


Рис. 2.6. Соединение секций волновой неперекрещивающейся обмотки

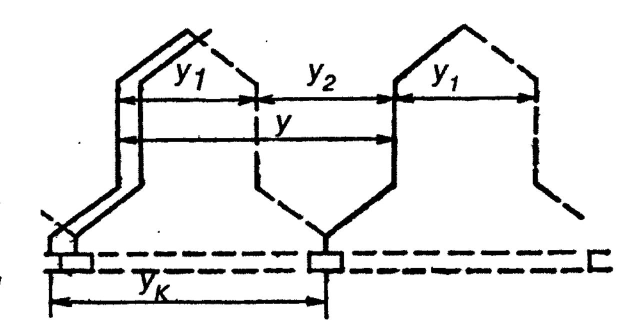


Рис. 2.7. Соединение секций волновой перекрещивающейся обмотки

$$y_1 = (Z_э/2p) - \varepsilon .$$

Результирующий шаг:

$$y = y_к = (K + 1)/p. \qquad (2.5)$$

Второй частичный шаг определяют поформуле:

$$y_2 = y - y_1. \qquad (2.6)$$

Знак «–» относится к левоходовой обмотке, знак «+» правоходовой.

Так как $У_к = У$ должен быть целым числом, то K не может принимать произвольных значений.

Пример. Рассмотрим построение простой волновой обмотки по данным: $K = Zэ = S = 17$; $2p = 4$.

Определим первый частичный шаг $y_1 = 17/4 = 4{,}25$, $\varepsilon = 0{,}2$.

Результирующий шаг по коллектору $y = (21 - 1)/2 = 10$.

Второй частичный шаг $y_2 = 10 - 5 = 5$.

При первом обходе по якорю укладываем секции *1* и *9* секций (рис. 2.8) При втором обходе укладываем секции *17* и *8* и т. д., пока не будут уложены все *17* секций и обмотка якоря не будет замкнутой. Затем, как и в простой петлевой обмотке, задавшись направлением вращения якоря, определяем направление ЭДС в сторонах секций якоря. Устанавливаем щетки и определяем их полярность. Далее выполняем схему параллельных ветвей, из которой видно (рис. 2.9), что обмотка состоит из двух параллельных ветвей ($2a = 2$). Это является правилом для всех простых волновых обмоток, у которых число паралельных ветвей всегда равно двум и она зависит от числа полюсов.

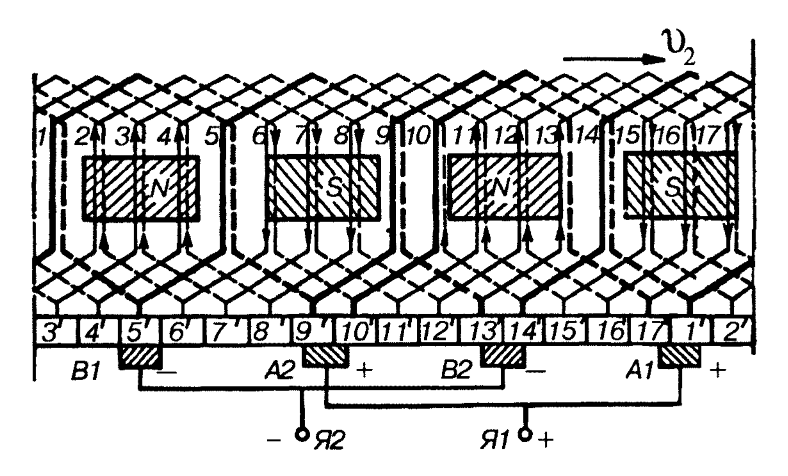


Рис. 2.8. Развернутая схема одноходовой волновой обмотки: 2p = 4, S = K = 17

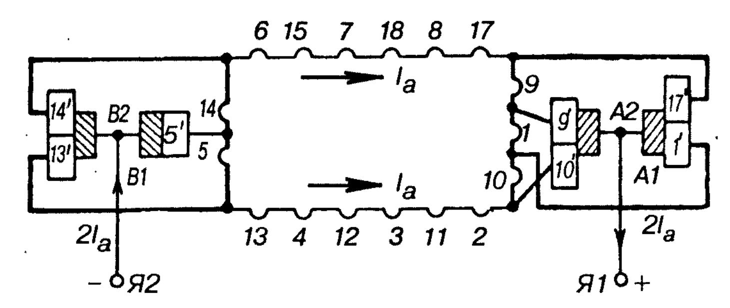


Рис. 2.9. Параллельные ветви одноходовой волновой обмотки

2.4. Сложные виды обмоток

К сложным видам обмоток относят : сложную петлевую, сложную волновую и комбинированную обмотки.

Сложная петлевая обмотка состоит из двух и более простых петлевых обмоток уложенных в пазы якоря. Иногда такую обмотку называют сложной параллельной. В этой обмотке секции и коллекторные пластины m простых

обмоток по окружности чередуются, и для отвода из обмотки необходимо, чтобы ширина щеток была меньше m коллекторных делений. Таким образом m простых обмоток включаются с помощью щеток и количество параллельных ветвей сложной петлевой обмотки $2a = 2pm$. Результирующий шаг по элементарным пазам и шаг по коллектору сложной петлевой обмотки $У = У_к = m$. Шаги $У1 = У2$ определяют также, как и для простой петлевой обмотки. Возможность получения в сложных обмотках большого числа витков без увеличения числа полюсов составляет наиболее отличительную особенность этих обмоток. Пример выполнения сложной петлевой обмотки показан на рис. 2.10.

Число параллельных ветвей обмотки $2a = 2pm$, где m — число простых петлевых обмоток.

Сложная петлевая обмотка применяется в тяговом генераторе постоянного тока типа ГП-311Б тепловозов 2ТЭ10М, 2М62, 2ТЭ10В и др.

Сложная волновая, как и сложная петлевая, также состоит из двух и более, простых волновых обмоток. Число параллельных ветвей сложной волновой обмотки $2a = 2m$ (обычно $2a = 4$), где m — число простых обмоток в сложной (обычно $m = 2$).

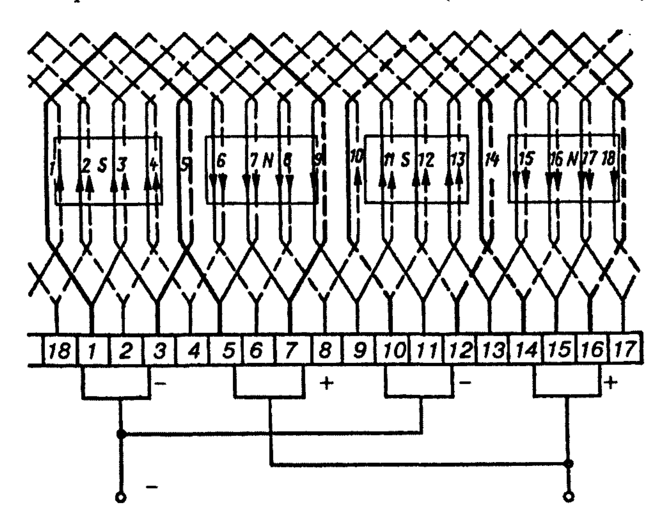


Рис. 2.10. Развернутая схема сложной петлевой обмотки с $Z_э = S' = K = 18$; $m = 2$; $2p = 4$

Комбинированная обмотка состоит из простой петлевой и простой волновой обмоток якоря уложенных в одних пазах якоря и присоедененных к общему коллектору. Так как обмотки расположены в четыре слоя, то к каждой пластине коллектора присоединяют по четыре проводника.

Комбинированую обмотку применяли в первых выпусках тягового генератора ГП3-11Б.

2.5. Условия симметрии обмоток

Обмотка якоря будет симметричной, если ЭДС ее паралельных ветвей при любом положении якоря будут равны и если параллельные ветви обладают одинаковым сопротивлением. Иначе в обмотке якоря появится ток при работе машины в холостую. Этот ток, вызванный разностью ЭДС паралельных ветвей называют уравнительным током. Уравнительный ток нагревает обмотку якоря и увеличивает плотность тока под щетками, вызывая искрение на коллекторе. Для устранения возможности появления уравнительных токов необходимо соблюдать определенные условия, называемые условиями симметрии обмотки якоря, и состоят они в следующем:

а) число проводников во всех пазах должно быть одинаковым т.е. $S = N/Z$ — целое число.

б) каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число пазов Z/a — целое число.

в) каждая пара параллельных ветвей должна содержать одинаковое число секций, т.е. $S/a = K/a$ — целое число.

г) каждой стороне секций, принадлежащей одной паре параллельных ветвей, должны соответствовать секционные стороны других пар параллельных ветвей, иначе говоря каждая пара параллельнных ветвей обмотки должна занимать одинаковое положение от системы главных полюсов $2p/a$ — целое число.

Иногда соединяют на лобовых частях со стороны, противоположной коллектору. Число точек равного потенциала, которое мы можем найти в симметричной обмотке, $a = p$. Расстояние между двумя соседними равнопотенциальными точками называют *потенциальным уравнительным шагом*, измеряемым числом

коллекторных делений или числом секций, соответствующих одной паре ветвей: $У_п = K/a = S/a = K/p$

Полное число уравнительных соединений первого рода $N_{ур}$, которое можно применить в обмотке, $N_{ур} = K/a$ (рис. 2.11).

В целях экономии меди и упрощения машины обычно применяют неполное число уравнителей из медного провода с сечением, равным 1/4, 1/2 сечения проводника обмотки якоря.

Тяговые электродвигатели постоянного тока электровозов и тепловозов выполняют с простой петлевой обмоткой. Со стороны коллектора под передними лобовыми частями обмотки якоря располагают уравнители первого рода.

Если простые волновые обмотки не требуют ни каких уравнительных соединений, то сложные волновые обмотки хорошо работают при выполнении их с уравнительными соединениями.

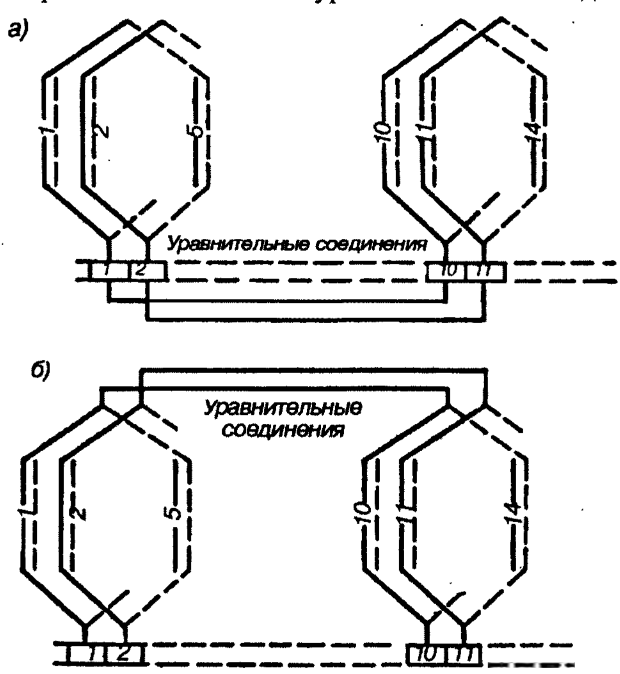


Рис. 2.11. Уравнительные соединения первого рода для простой петлевой обмотки:
а — уравнительные соединения со строны коллектора; б — то же со стороны боковых частей

В сложноволновой обмотке соединения коллекторных пластин принадлежат разным простым волновым обмоткам, если переходные сопротивления между щетками и коллекторными пластинами, принадлежащим разным обмоткам, не равны, то и токи в отдельных волновых обмотках также не равны. Неравномерное распределение тока повлечет за собой падение напряжения в обмотках, вследствии чего напряжение между соседними коллекторными пластинами может сильно увеличиться. Для устранения этого недостатка соединяют уравнительными проводами такие точки простых волновых обмоток, которые теоретически должны иметь одинаковые потенциалы.

Уравнительные соединения, выравнивающие не симметрию распределения напряжения по коллектору, называют уравнителями второго рода.

Таким образом уравнители первого рода выравнивают несимметрию магнитной системы машины, а уравнители второго рода — несимметрию распределения напряжения по коллектору. Уравнительные соединения применяют не только в сложноволновых, но и в сложнопетлевых обмотках.

В комбинированых обмотках волновая обмотка выполняет функции уравнительных соединений первого рода для петлевой обмотки, а петлевая обмотка выполняет функции уравнительных соединений второго рода для волновой обмотки.

2.6. Выбор типа обмоток

При выборе типа обмоток учитывают ряд требований, которые иногода протеворечивы. Обычно выбор обмотки определяется технико-экономическими требованиями. Наиболее предпочтительными являются обмотки с меньшим числом проводников, так как в этом случае уменьшается объем требуемой изоляции, уменьшаются размеры паза, повышается использование активного материала, уменьшается трудоемкость и стоимость изготовления обмотки. Число проводников будет тем меньше, чем меньше число параллельных ветвей она имеет.

С другой стороны по условиям уменьшения искрения под щетками ток параллельной ветви не должен превышать 300-350А.

Поэтому в ТЭД ТПС с током якоря до 300–350А применяют простые волновые обмотки, так как не требуется применение уравнительных соединений. При увеличении мощности увеличивается величина тока, приходиться увеличивать число параллельных ветвей, а также применяют простую петлевую обмотку и увеличивают число полюсов, увеличивая этим число параллельных ветвей.

Весьма важным фактором, определяющей выбор той или иной обмотки, является напряжение между соседними коллекторными пластинами.

Для общепромышленных электрических машин постоянного тока необходимо, чтобы среднее напряжение между соседними коллекторными пластинами не превышало 20–25В:

$$U_{к\,ср} = 2p\,U_{ном}/K < (20\text{–}25),$$

где $U_{ном}$ — номинальное напряжение на машинах, В.

Для тяговых машин с компенсационной обмоткой (о назначении и устройстве компенсационной обмотки подробно в следующей главе) $U_{к\,ср}$= 20 В; без компенсационной обмотки — 15–17 В.

Число коллекторных пластин увеличивают с повышением числа параллельных ветвей обмотки, поэтому для снижения $U_{кср}$ приходится в некоторых случаях выбирать обмотку с большим числом параллельных ветвей. При увеличении числа коллекторных пластин следует иметь в виду, что ширина коллекторной пластины не должна быть меньше 3–4 мм.

Во избежании пульсации напряжения на щетках тягового двигателя число пазов якоря на полюсе должно быть не менее 12.

В общем случае для якорей двухполюсных машин (вспомогательные машины ТПС) рекомендуется простая петлевая обмотка ($2p$ = 2), для многополюсных машин при токе якоря $Ia \leq 700$ А — простая волновая обмотка ($2a$ = 2), а при токе якоря $Ia > 700$ А — простая петлевая обмотка ($2a = 2p$). Если в последнем случае получается слишком большое число коллекторных пластин, то применяют сложную волновую обмотку

(2*a* = 2 м). Сложные петлевые обмотки применяют в мощных машинах постоянного тока, когда при простой петлевой обмотке ток в параллельной ветви будет превышать 300–350 А или напряжение между соседними коллекторными пластинами будет недопустимо высоким.

Если при определении очередного параметра получается не приемлемое его значение, то приходится выбирать новый вариант и каждый раз расчет начинать с начала.

2.7. Электродвижущая сила обмотки якоря

Электродвижущая сила (ЭДС) в обмотке якоря наводится в том случае, если ее проводники пересекают магнитные силовые линии главных полюсов.

В режиме холостого хода, когда ток в якоре $Ia = 0$, магнитный поток создается только обмоткой возбуждения. Его называют основным магнитным потоком.

Воздушный зазор δ между главными полюсами и поверхностью якоря за счет формы наконечников полюсов, делается значительно больше по их краям вследствие чего кривая распределения магнитной индукции в воздушном зазоре имеет трапециедальный характер с высотой равной B_δ (рис. 2.12). Заменяем трапецию прямоугольником с такой же площадью,но с шириной B_i и с высотой B_δ. Можно считать, что магнитная индукция в воздушном зазоре является постоянной величиной. В этом случае каждый проводник обмотки якоря будет пересекать при вращении одинаковое количество магнитных силовых линий в единицу

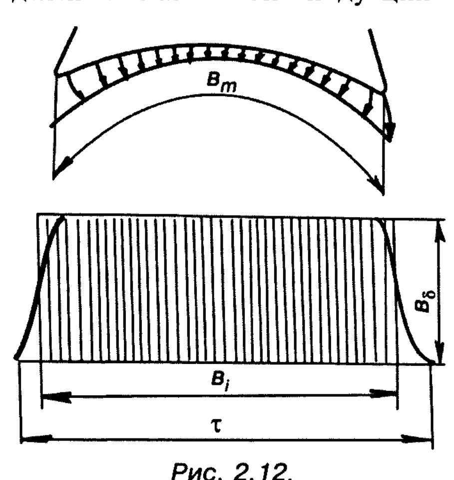


Рис. 2.12.

времени. Считаем, что обмотка якоря состоит из N активных проводников и образует $2a$ параллельных ветвей.

Среднее значение ЭДС индуктированой в одном проводнике составляет

$$e_{ср} = B_{ср} L v. \tag{2.7}$$

Чтобы определить ЭДС якоря необходимо ЭДС одного проводника умножить на число проводников и разделить число параллельных ветвей:

$$E = e_{ср}(N/2a) = B_{ср} L v (N/2a), \tag{2.8}$$

$$\Phi = B_{ср} S = B_{ср} L\tau$$

откуда

$$B_{ср} = \Phi/L\tau , \tag{2.9}$$

Линейная скорость вращения якоря

$$v = (\pi D_{а} n)/60, \tag{2.10}$$

где n — частота вращения якоря, об/мин;
$D_{а}$ — диаметр якоря;
L — длина проводника.

Длину окружности якоря можно определить как произведение полюсного деления на количество полюсов $2p$

$$\pi D_{а} = 2p\tau. \tag{2.11}$$

Подставим (2.11) в(2.10) получим

$$V = (2p\tau n)/60. \tag{2.12}$$

Подставив значение (2.12),(2.9) и (2.7) в (2.8), получим $E = \Phi/L\tau$ или

$$E = (p\Phi n N)/60a . \tag{2.13}$$

Для каждой машины p, N, a, неизменны, поэтому их можно обозначить констуктивной постоянной C_{e}

$$E = C_e \Phi n, \qquad (2.14)$$

где $C_e = pN/60a$.

Если вместо величины n ввести в формулу (2.14), угловую частоту вращения w, то получим

$$E = C_м \Phi w, \qquad (2.15)$$

где $C_м = (pN)/2\pi a$.

Как видно из выражений (2.14) и (2.15), ЭДС E пропорциональна основному магнитному потоку и частоте вращения и не зависит от формы кривой распределения индукции в воздушном зазоре.

Пример. Определите ЭДС машины постоянного тока, если число проводников якоря $N = 720$, число полюсов $2p = 4$, обмотка простая петлевая, частота вращения 2000 об/мин. Магнитный поток $\Phi = 0{,}1$ Вб.

Решение: Значение ЭДС (2.13) при простой петлевой обмотке $2a = 2p = 4$.

$E = (720 \times 2/60 \times 2) \times 0{,}1 \times 2000 = 220$ В.

2.8 Электромагнитный момент

При нагрузке машины по проводникам обмотки якоря протекает ток. При взаимодействии этого тока с магнитным полем возникает электромагнитная сила, величину которой определяют выражением

$$f = BiL\ . \qquad (2.16)$$

Сила создает момент проводника

$$M_{пр} = f(D_а/2). \qquad (2.17)$$

Если просуммировать все проводники якоря, создающие момент, то получим величину электромагнитного момента

$$M = M_{пр} N\ . \qquad (2.18)$$

Учитывая, что ток одного проводника якоря составляет

$$i = I_а/2a\ ,\qquad (2.19)$$

а также преобразовав выражение, умножив числитель и знаменатель на π, получим

$$D_а/2 = \pi D_а/2\pi\ .$$

Подставим в числитель значение длины окружности из формулы (2.11)

$$\pi D_а/2\pi = 2p\tau/2\pi = p\tau/\pi\ .\qquad (2.20)$$

Подставим в (2.18) выражение (2.17), (2.19) и (2.20), получим

$$M = pN/(2a\pi)I_а\Phi = C_м\Phi\ I_а\ ,\qquad (2.21)$$

где $C_м = pN/2a\pi$ — конструктивная постоянная момента. В системе СИ значения $C_е$ и $C_м$ одинаковы.

Из соотношений (2.14) и (2.21) вытекают два равноценных выражения для электромагнитной мощности

$$P_{эм} = E_аI_а = M_{эм}w = (M_{эм}n)/9{,}55.\qquad (2.22)$$

Контрольные вопросы и задания

1. Какой паз называют элементарным ?
2. Чему равны шаги простой петлевой обмотки ?
3. Сколько параллельных ветвей имеет простая петлевая обмотка ?
4. Для какой цели применяют сложные петлевые обмотки ?
5. Какое преимущество имеет комбинированная обмотка по сравнению со сложными обмотками ?
6. Каковы условия симметрии обмоток ?
7. Каково назначение уравнительных соединений и какие их виды применяются для обмоток машин постоянного тока ?
8. Как производится выбор типа обмоток для якоря машины постоянного тока ?
9. Определите число активных проводников обмотки якоря и число коллекторных

пластин у четырехполюсной машины, имеющей 31 реальный паз, 4п = 3 и число витков в секции равны.

10. Определите число параллельных ветвей у шестиполюсного генератора с простой петлевой обмоткой.

11. Определите число параллельных ветвей у восьмиполюсного двигателя с простой волновой обмоткой.

12. В каких случаях применяют сложные петлевые обмотки?

13. По данным, приведенным в таблице, рассчитать параметры и начертить развернутую схему простой петлевой (ПП), либо простой волновой (ПВ) обмотки якоря. Задавшись направлением вращения определите направление ЭДС в проводниках, расставте щетки и определите их полярность в генераторном режиме. Выполните схему параллельных ветвей.

Величины	Варианты											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Число пазов Z	18	20	21	24	24	25	31	30	33	24	25	32
Число полюсов $2p$	6	4	4	4	6	6	6	6	8	8	8	8
Тип об мотки	ПП	ПП	ПВ	ПП	ПП	ПВ	ПВ	ПП	ПВ	ПП	ПВ	ПП

14. От каких величин зависит ЭДС, индуктированная в обмотке якоря машины постоянного тока?

ГЛАВА 3.

Реакция якоря и коммутация в машинах постоянного тока

3.1. Магнитная цепь

Главные полюсы с обмотками возбуждения создают магнитодвижущую силу (МДС). МДС, в свою очередь, создает магнитное поле, магнитные линии которого замыкаются через участки машины, образующие ее магнитную систему. Рассмотрим магнитное поле машины при отсутствии нагрузки, т.е. в режиме холостого хода.

На поперечном разрезе машины (рис. 3.1) показан путь магнитного потока. В целях упрощения не показаны добавочные полюсы, так как в режиме холостого хода их влияние на картину магнитного поля машины не существенно. Из рисунка видно, что весь магнитный поток Φ, делится на две неравные части. Большая часть — основной магнитный поток $\Phi_б$; проникает через воздушный зазор в якорь и разветвляется в его сердечнике, подходит к соседним полюсам и замыкается через станину.

Основным магнитным потоком $\Phi_б$ называют поток в воздушном зазоре б, приходящийся на один полюс машины.

Меньшая часть — поток рассеяния $\Phi_б$ — замыкается между полюсами, минуя якорь. Тогда магнитный поток полюса

$$\Phi_{\text{п}} = \Phi_{\text{б}} + \Phi = (1 + \Phi/\Phi_{\text{б}})\Phi_{\text{б}} = K\Phi_{\text{б}}, \qquad (3.1)$$

где К = 1 – $\Phi/\Phi_б$ — коэффициент рассеивания главных полюсов. Для машин постоянного тока К = 1,12–1,25.

Магнитная цепь машины состоит из отдельных участков, каждый из которых обладает разным магнитным сопротивлением, т.к. устройства отличаются как физическими свойствами, так и размерами.

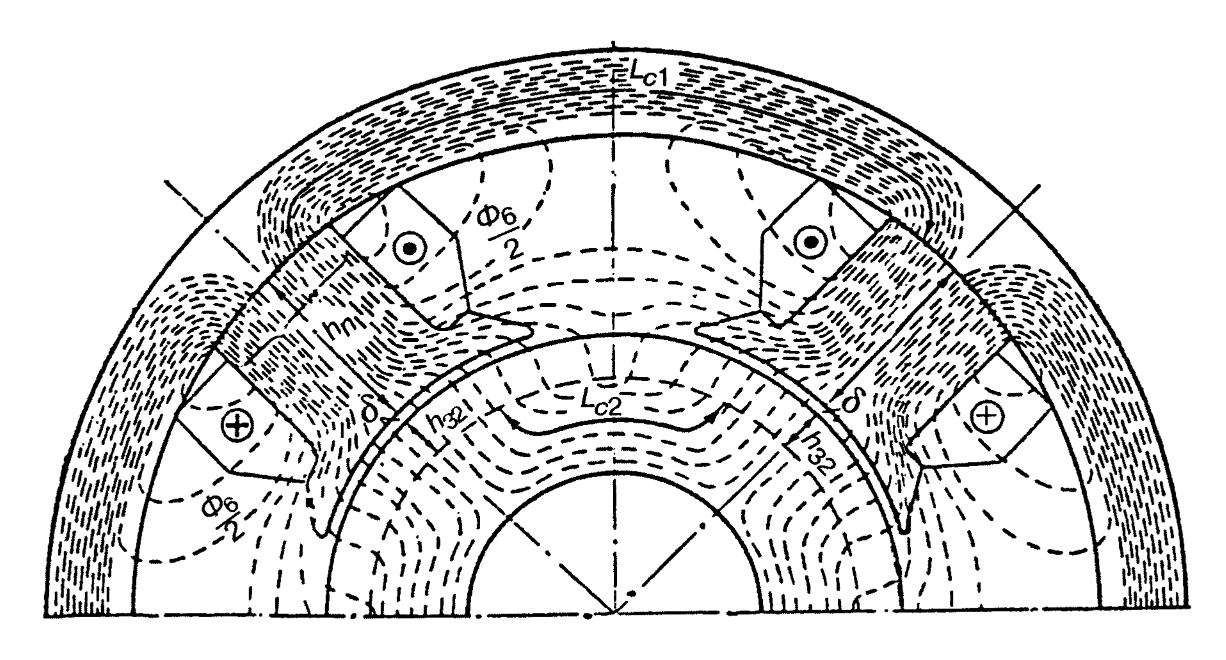


Рис. 3.1. Магнитная цепь машины постоянного тока

Вследствии магнитной симметрии отдельные магнитные цепи многополюсной машины одинаковы, и магнитные потоки равны между собой. По закону полного тока для замкнутого контура МДС одной пары полюсов ΣF определяют по формуле:

$$F_{\text{ов}} = I_{\text{в}} W_{\text{в}} = \oint HL = \sum I = \sum F,$$

где $I_{\text{в}}$ — ток возбуждения;

Wв — число витков обмотки возбуждения;

H — напряженность магнитного поля, зависящая от магнитной индукции и определяемая по кривым намагничивания;

L — средняя длинна данного участка магнитной цепи.

Рассчитанная на пару полюсов основная МДС машины

$$F_{\text{ов}} = F = 2F_{\text{б}} + 2F_{\text{м}} + 2F_{z} + 2F_{\text{а}} + F_{\text{я}}, \qquad (3.2)$$

где $F_{\text{б}}$, $F_{\text{м}}$, F_{z}, $F_{\text{а}}$, $F_{\text{я}}$ — магнитные напряжения воздушного зазора, зубцевого слоя якоря, главного полюса, спинки якоря, станины соответственно. Число 2 — указывает на то, что таких участков два (рис. 3.1).

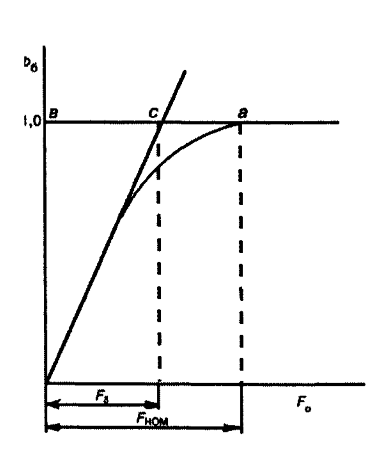


Рис. 3.2. Магнитная характеристика

Из уравнения (3.2) видно, что для определения МДС необходимо для каждого из пяти участков найти соответствующую ему напряженность магнитного поля H и умножить ее на длину потока на этом участке.

По результатам расчетов можно построить характеристику намагничивания машины $\Phi_{\text{б}} = f(F_{\text{о}})$, которую называют магнитной характеристикой (рис. 3.2). В начальной части магнитная характеристика имеет прямолинейный характер, так как при малых значениях потока Φ сталь машины слабо насыщена и МДС затрачивается на проведение потока через зазор. Затем с

ростом F наступает насыщение магнитной цепи машины и магнитная характеристика становится криволинейной.

Строить машины, особенно тяговые, с ненасыщенной магнитной цепью невыгодно, так как при этом материалы будут недоиспользованы и машина получится тяжелой. Кроме того, тяговые машины имеют ограниченный габарит и в сравнительно небольшое пространство необходимо вписать большую мощность. При ненасыщенной магнитной системе это сделать практически невозможно. Нецелесообразно также чрезмерно насыщать магнитную цепь, так как в этом случае необходимо выполнить мощную обмотку возбуждения с большим расходом меди и большими потерями мощности на возбуждение. По этой причине тяговые машины выполняют умеренно насыщенными при номинальном режиме. При этом рабочая точка лежит в колене кривой магнитной характеристики или чуть выше колена кривой намагничивания.

Обычно коэффициент насыщения $K_н$ равный отношению, $1/2F_вK_н$ = 1,1–1,35, а иногда $K_н$ = 1,7–2.

3.2. Реакция якоря

3.2.1. Понятие о реакции якоря

При нагрузке машины по обмотке якоря протекает ток, который создает свое магнитное поле. Для того чтобы подробно рассмотреть воздействие магнитного поля якоря на магнитное поле полюсов, и как при этом будут изменяться параметры машины воспользуемся принципом независимости действия магнитных полей.

При отсутсвии тока якоря магнитный поток главных полюсов (рис. 3.3, *а*) симметричен относительно оси полюсов. График распределения магнитной индукции в воздушном зазоре представляет собой трапецеидальную кривую.

Если ток возбуждения отключить, то магнитный поток главных полюсов будет отсутствовать. Остаточным магнитным потоком, ввиду его небольшой величины, можно пренебречь. По об-

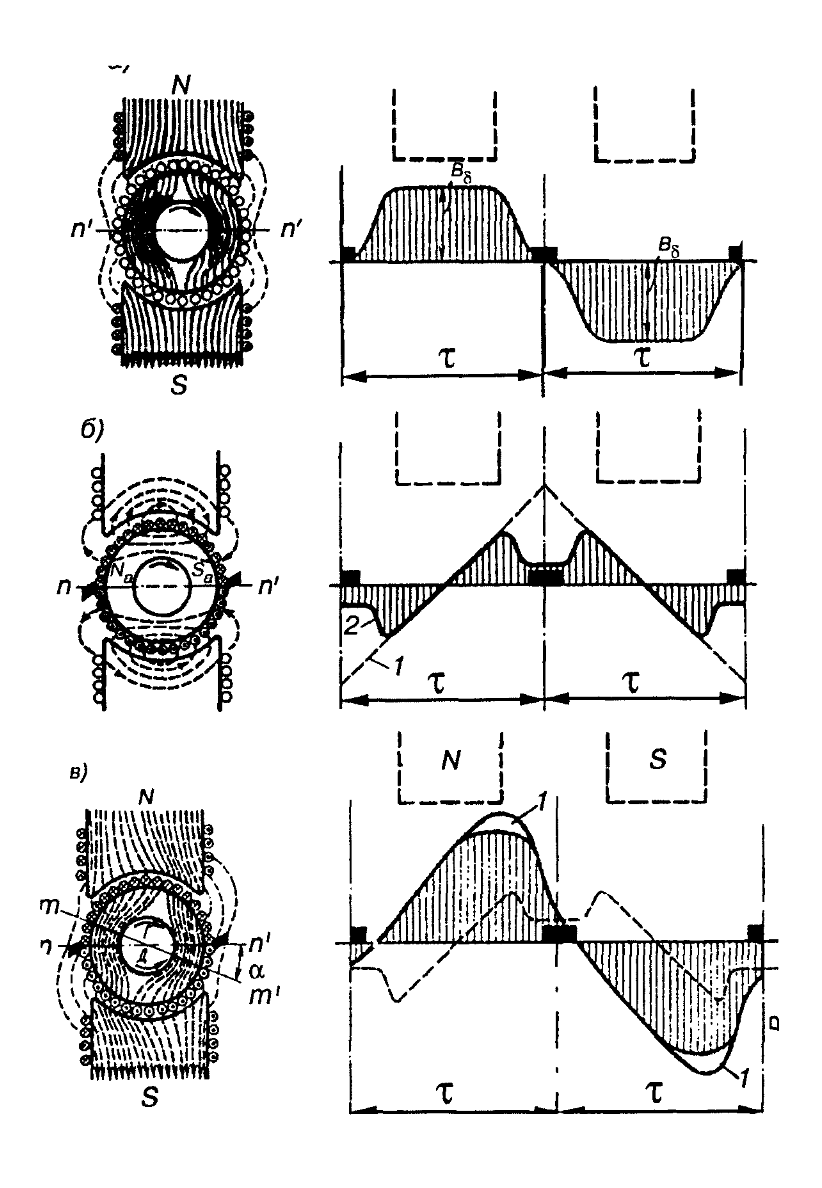


Рис. 3.3. Магнитное поле машины и распределение магнитной индукции в воздушном зазоре

мотке якоря пропустим номинальный ток, который будет создавать свою МДС — $F_а$. Магнитное поле якоря показано на рис. 3.3, *б*, из которого видно, что МДС якоря направлена по линии щеток, где имеет наибольшее значение (кривая *1*), а по оси полюсов кривая МДС равна нулю. В межполюсном пространстве магнитные силовые линии вынуждены замыкаться по воздуху, где, как известно, большое магнитное сопротивление, поэтому магнитная индукция резко ослабляется (рис. 3.3, *б*; кривая *2*).

МДС полюсов магнитного поля якоря повернут 0 на угол 90° относительно главных полюсов, вследствие чего поле якоря называют поперечным (рис. 3.3, *б*). Если щетки поворачивать, то вместе с ними будет поворачиваться магнитное поле якоря. И при повороте щеток на угол 90° (рис. 3.4), магнитное поле якоря будет продольным. Однако при такой установке щеток, машина будет неработоспособной.

Если магнитные поля двух полюсов и якоря наложить друг на друга,то получим результирующее магнитное поле (рис. 3.3, *в*). То же результирующее поле получим, если машина будет работать под нагрузкой, т.е. по якорю и по обмоткам возбуждения протекают номинальные токи. Магнитные силовые линии главных полюсов и якоря, совпадающие по направлению — суммируются. Поэтому густота магнитных силовых линий увеличивается. Если же магнитные силовые линии направлены навстречу друг другу, то они вычитаются. В итоге получаем разряжение силовых линий.

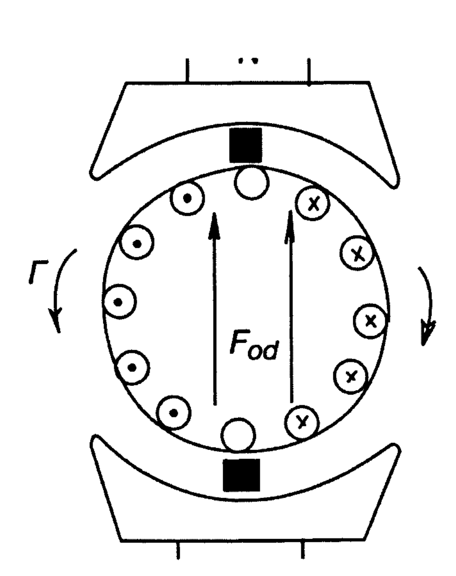


Рис. 3.4. Продольное поле якоря

Воздействие МДС якоря на магнитное поле машины называют реакцией якоря.

На рис. 3.3 показано действие реакции якоря машины постоянного тока, работающей в режимах генератора (*Г*) и двигателя (*Д*).

На рисунке показаны соответствующие направления вращения В результатов действия поперечной реакции якоря результирующее поле становится несимметричным относительно оси полюсов, в результате чего ось *т-т* результирующего поля поворачивается в генераторе (*Г*) по направлению вращения якоря, а в двигателе (*Д*) — в обратную сторону.

Линия *т-т*, проходящая через точки на поверхности якоря с индукцией В = 0, является физической нейтралью.

Чем больше нагрузка машины, тем сильнее искажение результирующего поля, а следовательно, тем больше угол смещения физической нейтрали.

Магнитный поток индуктирует в обмотке якоря ЭДС. Следовательно, как распределена магнитная индукция по окружности якоря, так распределена величина ЭДС по этой же окружности, и по окружности коллектора, куда присоединены концы секций обмотки якоря.

При нагрузке от действия реакции якоря индукция под одним из краев полюсного наконечника увеличивается до большей, значительной величины. В соответствии с этим увеличивается напряжение между соседними коллекторными пластинами.

Такое повышение напряжения может привести к искрению щеток.

При работе машины щетки истираются, и образуется графитовая пыль, которая попадает на изолированные промежутки между соседними коллекторными пластинами, создавая токопроводящие мостики. Но, если напряжение между соседними пластинами будет достаточно большим, то между ними на поверхности коллектора, не занятой щетками, возникают искровые разряды, в результате чего токопроводящие мостики перегорают. Это искрение опасно тем, что вызывает оплавление краев коллекторных пластина щетки, цепляясь за оплавления, быстро изнашиваются или происходит откалывание их краев и быстрое разрушение.

Если напряжение между соседними коллекторными пластинами возрастает, то появляются единичные вспышки искровых разрядов. В машинах большей мощности, например в ТЭД или в генераторах ТПС, единичные вспышки, растягиваясь, могут вызвать *круговой огонь*. Круговой огонь представляет собой мощную электрическую дугу на поверхности коллектора между

щетками разной полярности. Происходит короткое замыкание машины — ток резко увеличивается, что приводит к повреждению коллектора и выводу машины из строя.

Поэтому напряжение между соседними коллекторными пластинами, которое иногда называют межпламельным напряжением, не должно превышать величин, указанных в гл. 2.

Таковы последствия реакции без учета насыщения магнитной системы машины. Если же магнитная система машины насыщена, что характерно для тяговых машин, то результирующий магнитный поток уменьшается (см. рис. 3.3, *в*, заштрихованная площадь).

В результате ухудшаются рабочие свойства машины: у генератора уменьшается ЭДС, которая равна $E = C_в \Phi_п$, а у двигателей уменьшается электромагнитный момент: $M = C_м \Phi I_а$, Прямую $n_1 - n_1$, проходящую через центр окружности якоря, перпендикулярно оси главных полюсов называют *геометрической нейтралью*.

В режиме холостого хода физическая и геометрическая нейтрали совпадают.

Искажение кривой распределения индукции зависит от размеров выбранного воздушного зазора и будет тем больше, чем меньше выбранный зазор. При увеличении зазора требуется большая МДС главных полюсов и больший расход меди обмотки возбуждения. Поэтому наиболее часто зазор делают эксцентричным (см рис. 2.12), и применяют полюсные наконечники со скошенными краями.

Для выяснения картины поля в воздушном зазоре машины при нагрузке применяют понятие *линейной нагрузки якоря* (А, А/м), представляющей собой суммарный поток якоря, приходящийся на единицу длины его окружности по наружному диаметру якоря $D_а$

$$A = N i_а / (\pi D_а) , \qquad (5.3)$$

где $i_а = I_а / 2а$ — ток одного проводника якоря, А ;
$\pi = 3{,}14$.

Линейная нагрузка якоря определяет степень использования материалов и размеры машины при заданной номинальной

мощности. Ее значения колеблются от 5000 до 70 000 А/м, увеличиваясь с увеличением мощности. Через линейную нагрузку можно выразить МДС якоря:

$$F_а = NI_а(4ap) = A\tau. \qquad (3.4)$$

3.2.2. Компенсационная обмотка

Реакция якоря неблагоприятно влияет на рабочие свойства машин постоянного тока, особенно в мощных электрических машинах, которыми являются тяговые электродвигатели и тяговые генераторы ТПС.

Эффективным средством борьбы с вредным влиянием реакции якоря является *применение компенсационной обмотки.* Для ее укладки в полюсных наконечниках главных полюсов выштамповывают пазы, зеркально обратные пазам якоря (см. рис. 7.7). В эти пазы укладывают обмотку и включают ее последовательно с обмоткой якоря таким образом, чтобы МДС компенсационной обмотки $F_к$ была противоположной МДС обмотки якоря $F_а$. Если линейные нагрузки обеих обмоток равны ($A_а = A_{ко}$), то полностью устраняется влияние реакции якоря.

Последовательное включение компенсационной обмотки и обмотки якоря позволяет автоматически изменять МДС компенсационной обмотки при изменении нагрузки якоря.

При переходе от холостого хода к режиму нагрузки распределение магнитной индукции в воздушном зазоре между главными полюсами и якорем остается без изменения.

Компенсационную обмотку применяют в тяговых электродвигателях НБ-412К, НБ-418К6, НБ-520, ТЛ-2К и др.

В последнее время появилась тенденция применения компенсационной обмотки в общепромышленных машинах (серия 4П). Это связано с тем, что уменьшение воздушного зазора между главными полюсами и якорем, и уменьшение МДС обмотки возбуждения, приводит к уменьшению габаритов и массы машины.

3.3. Коммутация

3.3.1. Причины, вызывающие искрение на коллекторе

При работе электрической машины в щеточном контакте и на коллекторе появляется искрение. Сильное искрение вызывает порчу коллектора и сокращает срок службы машины. Причины, вызывающие искрение на коллекторе можно разделить на три группы: механические, потенциальные и электромагнитные.

К *механическим причинам* относят: нарушение геометрической формы коллектора (бочкообразность, овальность, конусность и т.д.); вибрации щеткодержателей, выступание над коллектором миканитовых прокладок, расположенных между коллекторными пластинами; неправильная регулировка нажатия на щетку; чрезмерный износ щеток; неправильная регулировка зазора между щеткодержателем и поверхностью коллектора и другие причины.

К *потенциальным причинам* относят повышение напряжения между соседними коллекторными пластинами, превышающее допустимое значение.

Электромагнитные причины обусловлены накоплением в коммутируемых секциях якоря запаса электромагнитной энергии $0,5L_c i^2$, которая, разряжаясь через щетки и коллекторные пластины является причиной искрения.

Любая из этих причин может вызвать сильное искрение, способное перейти в круговой огонь по коллектору. Искрение может быть вызвано не одной, а несколькими причинами.

Искрение на коллекторе *оценивают степенью или классом искрения. Степень 1* — искрения нет.

Степень 1 1/4 — слабое точечное искрение под небольшой частью края щетки, не вызывающее почернение коллектора и появления нагара на щетках.

Степень 1 1/2 — слабое искрение под большей частью щетки, приводящее к появлению следов почернения на коллекторе, легко устраняемых протиранием бензином, и следов нагара на щетках.

Степень 2 — искрение под всем краем щетки. Допускается только при кратковременных толчках нагрузки и при перегрузках. Приводит к появлению следов почернения на кол-

лекторе, не устраняемых протиранием поверхности коллектора бензином, а также следов нагара на щетках.

Степень 3 — значительное искрение под всем краем щетки, с появлением крупных вылетающих искр, приводящее к значительному почернению коллектора, не устраняемое протиранием бензином, а также к подгару и разрушению щеток. Допускается только для моментов прямого включения или реверсирования (изменения направления вращения) машин, если при этом коллектор и щетки остаются в состоянии, пригодном для дальнейшей работы.

Продолжительная надежная работа коллекторно-щеточного узла происходит при степени искрения, не превышающий 1 1/2.

Ток от щетки к коллектору и обратно передается следующим образом:

посредством механического контакта между щеткой и коллектором;

через графитовую токопроводящую пыль, которая образуется от трения щеток о коллектор;

между коллектором и щеткой образуются ионизированные воздушные щели, являющиеся хорошей токопроводящей зоной.

Если рассмотреть через увеличительные средства (лупу, микроскоп и др.) контактные поверхности щетки и коллектора, то обнаружим сплошные неровности, через которые проходит ток от щетки к коллектору. Плотность тока в этих неровностях достигает нескольких тысяч ампер на квадратный миллиметр. Поэтому эти точки накаляются до красного и белого каления. Однако эти неровности постоянно разрушаются, и время существования контакта невелико и не успевает нагреть щетки и коллектор.

От действия влаги, которая есть в воздухе, при прохождении тока через слой щеточного контакта, возникает явление элекролиза. От действия электролиза на поверхности коллектора образуется блестящая пленка оксидов, имеющая различную окраску (фиолетовую, розовую, коричневую, синестальную). Эту пленку оксидов называют политурой. Политура увеличивает переходное сопротивление щеточного контакта и уменьшает искрение. Поэтому политура является признаком хорошей коммутации. Сильное искрение разрушает политуру и появляются следы нагара.

3.3.2. Сущность коммутации

Коммутацией называют процесс переключения секций из одной параллельной ветви в другую и изменение направления тока в них на обратное путем замыкания этих секций щетками.

Секцию, в которой происходит процесс коммутации называют *коммутирующей.*

Время, в течении которого проте-кает коммутация, называют *периодом коммутации.*

На рис. 3.5 показана последовательность переключения секции. Для упрощения и лучшего понимания приняты следующие допущения: ширина щетки равна коллекторному делению, толщину изоляции между коллекторными пластинами не учитывают; щетки установлены на геометрической нейтрали; нагрузка машины постоянна и ток в каждой параллельной ветви равен $i_а$. Частота вращения якоря очень мала.

В начальный момент времени щетка находится под пластиной *1*, ток якоря *T* разветвляется по двум параллельным ветвям. Выде-

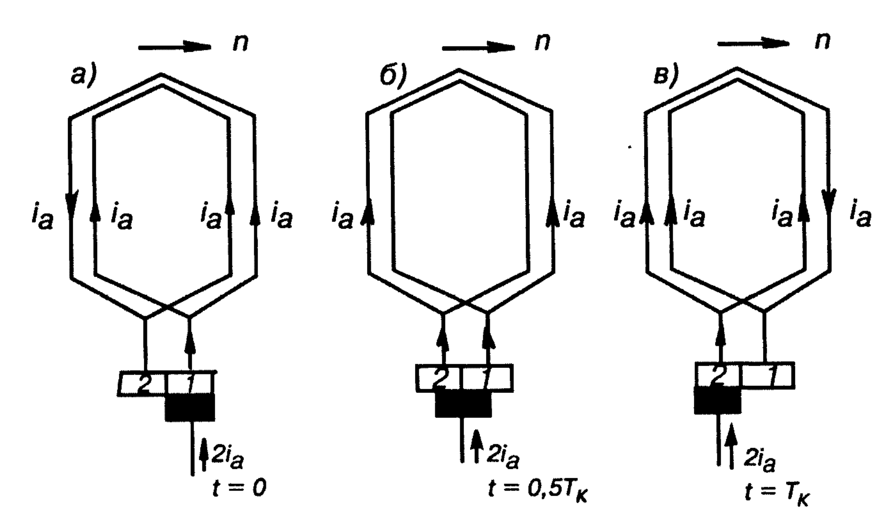


Рис. 3.5. Переход коммутирующей секции из одной параллельной ветви в другую

ленная жирным цветом коммутируемая секция находится в левой параллельной ветви. Затем при вращении коллектора щетка начинает перекрывать коллекторную пластину *2*. В коммутируемой секции ток начинает уменьшаться так как она постепенно закорачивается щеткой, обладающей сопротивлением, и ток изменяется по мере набегания коллекторной пластины. Когда щетка перекрывает обе коллекторные пластины, занимая одинаковую площадь перекрытия щетки, ток в коммутируемой секции уменьшается до нуля (см. рис. 3,5, *б*). Коммутируемая секция как бы занимает промежуточное положение между правой и левой параллельными ветвями. Затем площадь перекрытия коллекторной пластины *1* уменьшается, а пластины *2* — увеличиваеся. Пропорционально площади перекрытия *2* увеличивается ток в коммутируемой секции, но противоположного направления. На рис. 3.5, *в* щетка находится под пластиной *2*, а коммутируемая секция — в правой параллельной ветви.

Обозначив сопротивление переходных контактов сбегающих и набегающих краев щетки через $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$, для коммутируемой секции составим уравнение по второму закону Кирхгофа ($\Sigma e = 0$) Это возможно в том случае, если процесс изменения тока происходит очень медленно, и в коммутируемой секции почти не возникает ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции:

$$\sum e = R_{щ2}\, i_2 = 0 \qquad (3.б)$$

Для узлов а и с по первому закону Кирхгофа ;

$$i_1 = I_а - i; \quad i_2 = I_а + i. \qquad (3.6)$$

Подставив (3.6) в (3.5) получим:

$$R_{щ2}(i_а + i) = R_{щ1}(i_а + i)\ ; \qquad (3.7)$$

$$i = (R_{щ2} - R_{щ1})I_а/(R_{щ2} + R_{щ1}). \qquad (3.8)$$

Из формулы (3.8) следует, что изменение тока секции i определяют только изменением $R_{щ1}$ и $R_{щ2}$, вследствии чего этот случай коммутации называют *коммутацией сопротивления.*

Площади касания щетки с коллекторными пластинами *2* и *1* будут: $S_1 = b_{щ1} l_{щ1}$; $S_2 = b_{щ2} l_{щ2}$. Полная площадь касания щетки и коллекторной пластины $S_щ = b_щ l_щ$, где l — длина щетки; $b_{щ1} = v_к t$; $b_{щ2} = v_к (T_к - t)$; $b_щ = v_к T$; где $v_к$ — окружная скорость коллектора.

$$R_{щ1}/R_щ = S_щ/S_1 = l_щ v_к T/(l_щ v_к t) = T_к/t;$$

$$R_{щ2}/R_щ = S_щ/S_2 = l_щ v_к T_к/l_щ v_к (T_к - t) = T_к/(T_к - t);$$

$$R_{щ1} = R_щ T_к/t; \; R_{щ2} = R_щ T_к/(T_к - t). \qquad (3.9)$$

Подставив (3.9) в (3.8) получим

$$i = i_а(1 - 2t/T_к). \qquad (3.10)$$

Это уравнение является линейным, поэтому график изменения тока $i = f(t)$ представляет собой прямую линию *1* (рис. 3.6). Физически это означает, что уменьшение тока, проходящего через сбегающую пластину коллектора, пропорционально уменьшению площади контакта щетки с этой пластиной, а увеличение тока через набегающую пластну пропорционально уменьшению площади контакта щетки этой пластины.

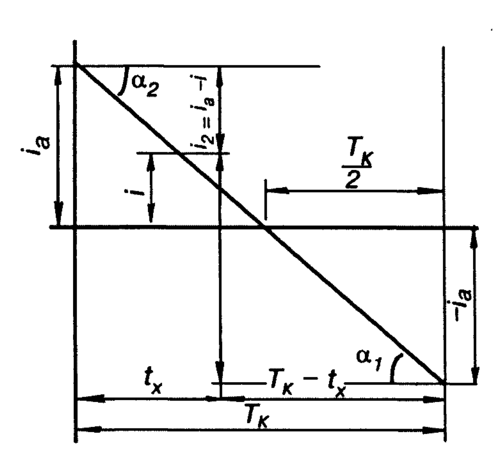


Рис. 3.6. График тока прямолинейной коммутации

Прямолинейное изменение тока возможно только при очень малой частоте вращения, т.е. при $n \to 0$. Плотность тока под щетками при прямолинейной коммутации одинаковая.

3.3.3. Криволинейная коммутация

В современных электрических машинах ТПС период коммутации $T_к$ очень мал и составляет приблизительно 10^{-3}÷10^{-5} с. За такой очень и очень малый промежуток времени ток в коммутируемой секции должен изменить свое направление. Поэтому согласно правилу Ленца возникает ЭДС самоиндукции :

$$e_L = -L_с(di/dt), \qquad (3.11)$$

где $L_с$ — индуктивность секции ;

i — ток секции.

Обычно щетка перекрывает не одну, а несколько коллекторных пластин, и в одном пазу якоря находится несколько пазовых сторон, принадлежащих, разным секциям, одновременно находящихся в состоянии коммутации. Поэтому изменение магнитного потока каждой из этих частей индуктирует в пазовых сторонах других секций ЭДС взаимоиндукции

$$e_м = -M_с(di/dt), \qquad (3.12)$$

где $M_с$ — взаимная индуктивность одновременно коммутирующих секций.

ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции действуют в одном направлении — суммируются и образуют реактивную ЭДС :

$$e_р = e_L + e_M = -(L_с + M_с)(di/dt) . \qquad (3.13)$$

Реактивная ЭДС препятствует прямолинейному изменению тока в коммутируемой секции.

Кроме ЭДС самоиндукции и ЭДС взаимоиндукции в коммутируемой секции при вращении якоря индуктируется ЭДС вращения, вызванная магнитным потоком реакции якоря. Направление ЭДС вращения зависит от направления магнитных линий поля и направления вращения якоря:

$$e_в = 2B_к lvW_с, \qquad (3.14)$$

где $B_к$ — магнитная индукция;

l — длина активных сторон секций;
v — линейная скорость движения секции;
$W_с$ — число витков секции.

Таким образом в коммутируемой секции действуют три ЭДС:

$$\Sigma e = e_с + e_м \pm e_в = e_р + e_в. \tag{3.15}$$

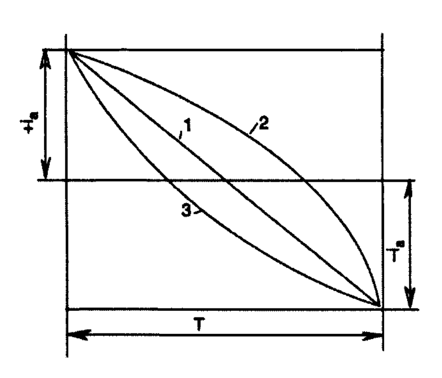


Рис. 3.7. График тока криволинейной коммутации

Реактивная ЭДС и ЭДС вращения препятствуют прямолинейному изменению тока в коммутируемой секции.

Коммутация становится криволинейной замедленной (кривая *2* рис. 3.7).

3.3.4. Способы улучшения коммутации

В коммутируемой секции, которая закорочена щеткой, возникает реактивная ЭДС $E_р$, создающая добавочный ток:

$$I_р = E_р/\Sigma R, \tag{3.16}$$

где $\Sigma R = R_с + R_к + R_щ$ — сопротивление контура коммутируемой секции;
$R_с$ — сопротивление секции;
$R_к$ — сопротивление коллектора;
$R_щ$ — сопротивление ицеток.

Для улучшения коммутации необходимо уменьшить добавочный ток до нуля. Для этого или увеличивают ΣR, или уменьшают $E_р$, или производят оба действия одновременно.

Улучшение коммутации путем увеличения сопротивления контура коммутируемой секции.

Если увеличивать сопротивление секций, то уменьшится КПД машины. Нельзя также увеличивать сопротивление коллектора, что также уменьшит КПД машины. Наиболее приемлемым является подбор щеток с надлежащими характеристиками и сохранение «политуры» — оксидной пленки на поверхности коллектора. Для этого в машинах постоянного тока применяют щетки с повышенным значением переходного сопротивления; в машинах с тяжелыми режимами работы — электрографитные и угольнографитные; в низковольтных машинах — медно- или бронзографитные. Электрические свойства щеток характеризует величина, зависящая от их переходного сопротивления — переходным падением напряжения на пару щеток $U_ш$ при номинальной плотности тока (см. табл. 3.1).

Уменьшение реактивной ЭДС. Уменьшая ЭДС взаимоиндукции можно существенно уменьшить величину реактивной ЭДС. Как указывалось выше, ЭДС взаимоиндукции в значительной мере зависит от ширины щетки: чем шире щетка, тем большее количество коллекторных пластин она перекрывает и тем большее количество секций вступают в процесс коммутации, что

Таблица 3.1.

Группа щеток, обозначенне	Переходное паденне напряження на пару щеток прн номинальном токе, В	Номинальная плотность тока, А/мм^2	Область применения
Графитовые, Г; 611М	1,9–2,0	0,11–0,12	Для машин с облегченными условиями коммутации
Электрографитированные, ЭГ	2,0–2,7	0,10–0,15	Для машин со средними и затруднительными условиями коммутации
Угольио–графитовые, УГ; Т	2,0	0,06-0,07	Для машии со средними условиями коммутации
Медно-графитовые, М; МГ	0,2–1,5	0,15–0,20	Для машин низковольтных (до 48 В), контактных колец

увеличивает ЭДС взаимоиндукции. Однако сделать узкие щетки, равные ширине одной коллекторной пластины, невозможно из-за недостаточной механической прочности. Площадь щетки определяется ее плотностью тока. Поэтому при узкой щетке необходимо увеличивать длину коллектора, что в ограниченных габаритах электрических машин ТПС сделать очень сложно. Обычно ширина щетки составляет 2–3 коллекторных деления.

Эффективным средством уменьшения магнитной связи между переключаемыми секциями является их укорочение, т.е. выполнение с укороченным шагом ($y < \tau$). В этом случае активные стороны одновременно коммутируемых секций окажутся в разных пазах, что уменьшит ЭДС взаимоиндукции.

ЭДС самоиндукции зависит от индуктивности коммутируемой секции, т.е. от глубины паза якоря. С этой целью целесообразно увеличивать ширину паза и уменьшать его глубину, до достижения предельной индукции в зубцах якоря.

Добавочные полюсы. Добавочные полюсы предназначены для создания в зоне коммутации магнитного поля такой величины и направления, чтобы наводимая этим полем в коммутируемой секции коммутируемая ЭДС $\mathrm{E}_к$ компенсировала реактивную ЭДС $E_р$:

$$E_р = E_к$$

Добавочные полюсы располагают между главными, а щетки устанавливают на геометрической нейтрали.

Полярность добавочного полюса выбирается следующей: в режиме работы генератора за главным полюсом по вращению якоря следует добавочный противоположной полярности, а в режиме двигателя — добавочный полюс той же полярности.

Для соблюдения пропорциональности между нагрузкой машины и магнитным потоком добавочных полюсов, необходимо обмотку полюсов включать последовательно с обмоткой якоря. В этом случае МДС добавочных полюсов будет уравновешивать МДС якоря и создавать необходимую индукцию B, в зоне коммутации.

Магнитная цепь машины насыщена. Если насыщенными будут добавочные полюсы, то в зоне больших токов не будет компенсирована реактивная ЭДС.

Для уменьшения насыщения добавочных полюсов увеличивают зазор под добавочным полюсом. Но, при большом зазоре увеличивается магнитный поток рассеяния, который вместо замыкания через якорь будет замыкаться через рядом расположенный главный полюс другой полярности. Поэтому делают два зазора. Второй зазор — между сердечником добавочного полюса и остовом, где устанавливают диамагнитную прокладку из меди, алюминия, текстолита и т.д.

Наконечник добавочного полюса делают заостренным, для того чтобы его магнитный поток был направлен в коммутируемую секцию на якоре. Сердечник добавочного полюса (рис. 3.8) делают сплошным.

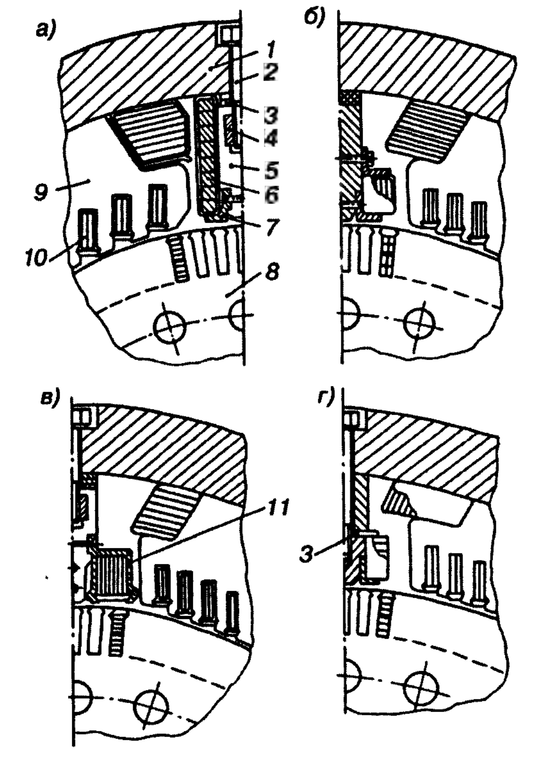


Рис. 3.8. Магнитные системы ТЭД с различными добавочными полюсами:

а — распределенная катушка добавочного полюса; б — низкоопущенная катушка; в — низкоопущенная катушка добавочного полюса в обойме; г — низкоопущенные катушка и второй зазор добавочного полюса; 1 — остов; 2 — болт; 3 — немагнитная прокладка (второй зазор); 4 — стальной стержень; 5 — сердечник добавочного полюса; 6 — катушка добавочного полюса; 7 — латунный наконечник; 8 — якорь; 9 — главный полюс; 10 — компенсационная обмотка; 11 — немагнитная металлическая обойма

Добавочные полюса применяют в машинах мощностью более 0,3 кВт. Обычно количество добавочных полюсов равно количеству главных полюсов и только при мощности меньше 2,5 кВт иногда на пару полюсов ставят один добавочный полюс, Например двигатель привода топливоподкачивающего насоса тепловозов 2ТЭ10В, 2М62 и др. содержат два главных полюса и один добавочный.

Применение добавочных полюсов позволяет увеличить линейную нагрузку якоря и уменьшить размеры машины.

Следует тщательно рассчитывать и подбирать количество витков обмотки возбуждения добавочного полюса. При недостаточном количестве витков не будет полной компенсации реактивной ЭДС, а при чрезмерном $E_к > E_р$.

Коммутация будет ускоренной (кривая *3*, см рис. 3.7).

Смещение щеток с геометрической нейтрали. В машинах, в которых отсутствуют добавочные полюсы, магнитное поле, необходимое для создания коммутируемой ЭДС, можно получить сдвигом щеток с геометрической нейтрали. Это можно выполнить в машинах без добавочных полюсов мощностью до 1 кВт и не изменяющих направления вращения якоря (нереверсируемых).

Если щетки сдвинуть и установить на физической нейтрали, то ЭДС вращения будет равна нулю, а в коммутируемых секциях наводится лишь реактивная ЭДС $E_р$. При сдвиге щеток за физическую нейтраль, магнитное поле реакции якоря изменит свое направление относительно направления при положении щеток на геометрической нейтрали. Это поле будет наводить в коммутирующих секциях ЭДС вращения, которая равна реактивной ЭДС, но противоположна по направлению ($E_в - E_р = 0$).

Реактивная ЭДС и ЭДС вращения равны и противоположны по направлению, т.е. скомпенсированы.

Щетки смещают в направлении вращения якоря у генераторов или против направления вращения у двигателей.

Способ имеет ряд недостатков: а) способ не применим для реверсируемых машин, так как при одном направлении вращения физическая нейтраль поворачивается в одну сторону, а при другом — нейтраль повернется в противоположном направлении, а смещение щеток с геометрической нейтрали остается прежним, что может привести к круговому огню на коллекторе;

б) при смещении щеток с геометрической нейтрали усиливается размагничивающее действие реакции якоря;

в) полученное коммутирующее поле якоря изменяется не пропорционально нагрузке машины, что делает невозможным применение данного способа в машинах ТПС.

3.3.5. Коммутация в машинах пульсирующего поля

На электровозах и электропоездах переменного тока тяговые электродвигатели получают питание через трансформатор *Т*, выпрямительную установку с диодами *V*1–*V*4, сглаживающий реактор *Р*. Выпрямительная установка преобразует однофазный переменный ток в пульсирующий (рис. 3.9). Его можно представить в виде суммы постоянной *I* и переменной *i* составляющих. Постоянная составляющая *I* пульсирующего тока является его средним значением. Переменная составляющая *i* несинусоидальная и может быть разложена на гармонические составляющие. В расчетах учитывают основную гармонику тока. Частота и амплитуда этой гармоники определяют схемой выпрямления и параметрами цепи якоря.

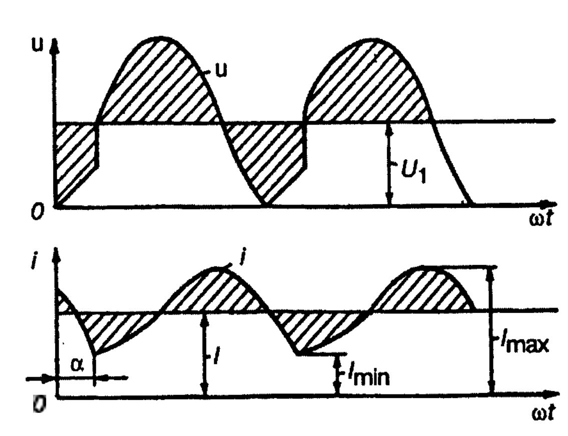


Рис. 3.9. Кривые напряжения и тока при двухполупериодном выпрямлении однофазного тока

Переменная составляющая тока создает переменную составляющую магнит- ного потока, которая индуктирует в коммутируемой секции трансформаторную ЭДС $E_р$ Действующее значение первой гармоники этой ЭДС определяют по формуле:

$$E_т = 4{,}44\Phi_{м1} W_s f_1, \qquad (3.17)$$

где $\Phi_{м1}$ — амплитуда первой гармоники составляющей магнитного потока;

f_1 — частота первой гармоники, переменной составляющей магнитного потока;

W_s — число витков в коммутируемой секции.

Трансформаторная ЭДС E_1 отстает от магнитного потока на угол 90° и в коммутируемой секции не компенсируется коммутируемой ЭДС.

Трансформаторная ЭДС вызывает появление тока в коммутируемой секции. Если ток превысил определенный предел, то при завершении коммутации, когда происходит разрыв этого тока, появляется искрение щеток.

Если сердечник добавочного полюса и ярмо статора выполнены массивными, то переменная составляющая магнитного потока будет наводить в них вихревые токи, вызывающие ослабление магнитного потока и сдвиг его по фазе относительно тока и МДС добавочных полюсов.

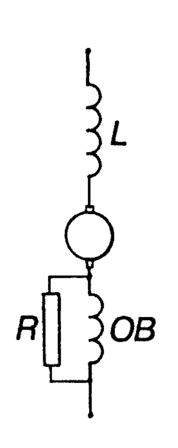


Рис. 3.10. Улучшение коммутации двигателей пульсирующего тока

Для улучшения коммутации машин пульсирующего тока стараются уменьшить влияние вихревых токов. Для этого остов и сердечники добавочных полюсов выполняют из отдельных пластин электротехнической стали толщиной 0,5–1,0 мм. Вследствии этого сопротивление вихревым токам увеличивается в несколько десятков раз. При массивном магнитопроводе тягового электродвигателя угол отставания составляет 45°, а при шихтованном 15°. Уменьшению вихревых токов способствует увеличение числа пар полюсов машины, так как при этом уменьшается магнитный поток полюса, что приводит к уменьшению размеров станины. Уменьшению трансформаторной ЭДС способствует увеличение числа полюсов.

Параллельно обмотке возбуждения удобавочных полюсов включают резистор (рис. 3.10),

который вызывает отставание переменной составляющей тока в обмотке главных полюсов от переменной составляющей тока в обмотке якоря. Индуктивное сопротивление обмотки возбуждения главных полюсов обладает большим сопротивлением для переменной составляющей тока, поэтому она проходит по резистору R а постоянная составляющая — по обмотке возбуждения главных полюсов. Обычно сопротивление резистора выбирают таким, чтобы по нему проходил ток 3–6% от постоянной составляющей тока.

Кроме того, чтобы уменьшить пульсацию выпрямленного тока, последовательно в цепь якоря включают сглаживающий реакторы L. Подробно о работе сглаживающего реактора описано в главе 19.

3.4. Круговой огонь по коллектору

Круговой огонь по коллектору представляет собой короткое замыкание машины через электрическую дугу по поверхности коллектора. Обычно возникает при чрезвычайно сильном расстройстве коммутации. Круговой огонь, как правило, вызывает значительные повреждения коллектора, щеток и щеткодержателей.

Через дугу проходит большой ток короткого замыкания переключаемой секции и частично ток якоря. Из-за движения коллектора дуга растягивается и ею замыкаются коллекторные пластины за пределами щетки. Большой ток якоря вызывает усиление действия реакции якоря и, как следствие, значительное искажение распределения индукции в воздушном зазоре, что приводит к увеличению потенциала между коллекторными пластинами. Все это еще более способствует поддержанию дуги между щетками и коллекторными пластинами.

Контрольные вопросы

1. Чему равна МДС обмотки возбуждения?
2. Какие участки содержит магнитная цепь машины постоянного тока?
3. Почему МДС якоря, дейсвующая по поперечной оси, вызывает размагничивание машины?
4. Как получить чисто продольную реакцию якоря?
5. С какой целью компенсационную обмотку соединяют последовательно с обмоткой якоря?
6. Какие причины вызывают искрение на коллекторе?
7. Какие степени искрения предусмотрены ГОСТом?
8. В каких случаях коммутация будет прямолинейной? криволинейной?
9. Объясните назначение и устройство добавочных полюсов.
10. Какие требования предъявляют к щеткам?
11. В каких случаях применяют сдвиг щеток с геометрической нейтрали?
12. Каковы причины кругового огня по коллектору?

Глава 4.

Генераторы постоянного тока

4.1. Условные обозначения обмоток

Стандартами Российской Федерации установлены обозначения обмоток машин постоянного тока; как то якоря, обмоток возбуждения главных и добавочных полюсов. компенсационной обмотки (рис. 4.1).

Начало и концы обмоток обозначают следующим образом: якоря *Я1* и *Я2*; независимой обмотки возбуждения *Н1* и *Н2*; параллельной обмотки возбуждения *Ш1* и *Ш2*; последовательной обмотки возбуждения *С1* и *С2*; компенсационной обмотки *К1* и *К2*; обмотки возбуждения добавочных полюсов *Д1* и *Д2*.

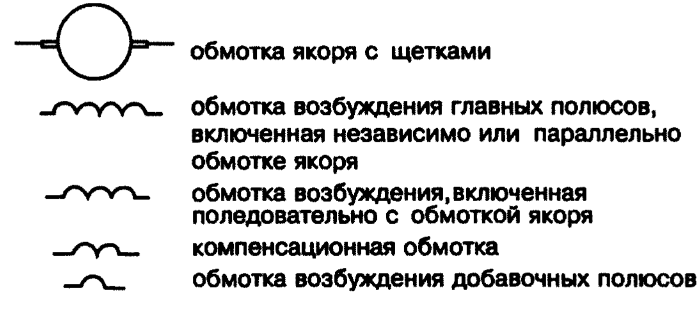


Рис. 4.1. Условные обозначения обмоток

4.2. Способы возбуждения генераторов постоянного тока

По способу вобуждения генераторы постоянного тока разделяют на две группы: генераторы с независимым возбуждением (рис. 4.2, *а*, *д*) и генераторы с самовозбуждением (рис. 4.2, *б*, *в*, *г*). Генераторы с независимым возбуждением разделяют на генераторы с электромагнитным возбуждением (см. рис. 4.2, *а*) и генераторы с магни-

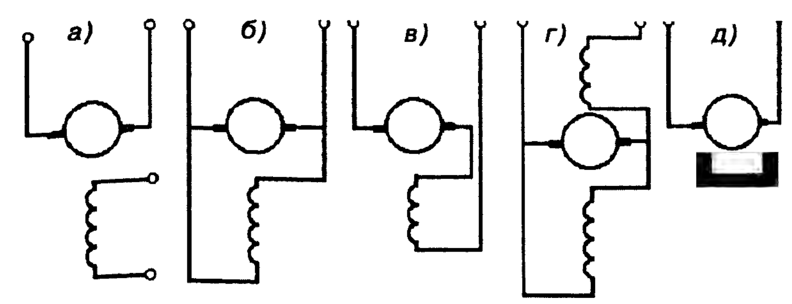


Рис. 4.2. Способы возбуждения генервторов постоянного тока

тоэлектрическим возбуждением (см. рис. 4.2, *д*). Последние на тяговом подвижном составе практически не применяют и поэтому в данной книге не рассматриваются. У генераторов с электромагнитным возбуждением обмотка возбуждения (0В) питается от постороннего источника (возбудитель,вспомогательный генератор или аккумулятор). Магнитоэлектрические генераторы содержат полюса в виде постоянных магнитов.

У генераторов с самовозбуждением обмотки возбуждения получают питание от обмоток якоря. Эти генераторы в зависимости от способа включения обмоток возбуждения относительно обмоток якоря делят на генераторы параллельного возбуждения (шунтовые, см. рис. 4. 2, *б*); генераторы последовательного возбуждения (сериесные, см. рис. 4.2, *в*); генераторы смешанного возбуждения (компаудные, см. рис. 4.2, *г*).

4.3. Уравнения напряжений, моментов и мощностей

Если к якорю генератора подключить нагрузку, то по цепи якоря, включая обмотку, потечет ток. *Сопротивление цепи якоря* — это сумма сопротивлений всех участков цепи якоря: обмотки якоря $r_а$; переходного щеточного контакта $r_щ$; обмотки возбуждения добавочных полюсов $r_д$; компенсационной обмотки $r_{ко}$; последовательной обмотки возбуждения $r_с$ (если генератор последовательною возбуждения)

$$R_а = r_а + r_щ + r_{ко} + r_с, \qquad (4.1)$$

Если в машине отсутствует какая-либо из обмоток в выражение (4.1) не будет входить соответствующее слагаемое.

Запишем для замкнутого контура (см. рис. 4.3) уравнение по второму закону Кирхгофа

$$E = IR_н + R_а. \qquad (4\text{-}2)$$

Падение напряжения на нагрузке $IR_Н$ соответствует напряжению на зажимах генератора. В режиме генератора всегда $U > E$.

Умножим правую и левую части выражения (4.2)на ток i, получим :

$$UI=EI - I^2R_а, \qquad (4.3)$$

где $UI = P_2$— полезная мощность генератора;

$EI = P_{эм}$— электромагнитная мощность генератора;

$I^2R_а = P_{эа}$— мощность потерь на нагрев обмоток и щеточного аппарата.

$$P_2 = P_{эм} - P_{эа}. \qquad (4.4)$$

Генератор вращается приводным двигателем. В качестве приводного двигателя на тепловозе используют дизель, а в других случаях, например, генератор управления электровоза — приводом является электродвигатель. Приводной двигатель для вращения якоря затрачивает определенный момент M_1. При протеканиии тока по обмотке якоря появляется электромагнитный момент M (см. рис. 5.4), направленный против вращения приводного двигателя, т.е. тормозной момент. Кроме того необходимо затрачивать часть момента на преодоление трения в подшипниках генератора, трения щеток о коллектор, сопротивления якоря о воздух (M_0).

$$M_1 = M_0+M \,. \qquad (4.5)$$

Выражение (4.5) справедливо для постоянной частоты вращения приводного двигателя. Из курса «Энергоустановки» известно, что частота вращения дизеля при ведении поезда меняется в некоторых пределах. А из технической механики известно, что изменение частоты вращения тела, обладающего

некоторой массой, которой является якорь генератора, приводит к появлению динамического момента $M_{дин}$.

$$M_{дин} = J(d\omega/dt), \qquad (4.5,\ a)$$

где J — момент инерции вращающихся частей генератора;
$d\omega/dt$ — изменение скорости вращения.

Динамический момент соответствует изменению кинетической энергии вращающихся масс. При увеличении частоты вращения момент $M_{дин} > 0$ и, как и момент $M_о + M$, является тормозным. В данном случае кинетическая энергия вращающихся масс увеличивается за счет работы приводного двигателя. Когда момент $M_{дин} < 0$, он совпадает с направлением вращения и является движущим, поддерживая вращение за счет уменьшения кинетической энергии вращающихся масс. Тогда уравнение (4.5) будет иметь вид:

$$M_1 = M_о + M \pm M_{дин}, \qquad (4.6)$$

При постоянной частоте вращения $M_{дин}$=0. В этом случае выражение (4.6) переходит в выражение (4.5).

Умножив правую и левую части выражения (4.5) на ω, получим

$$P_1 = P_о + P_{эм} + P_в, \qquad (4.7)$$

где P_1 — подводимая к генератору мощность от приводного двигателя;
$P_в = I^2_в R$ — мощность потерь в обмотке возбуждения.

В выражение (4.7) подставим (4.4) и получим уравнение мощности генератора

$$P_1 = P_2 + P_о + P_{эа} + P_в. \qquad (4.8)$$

Таким образом мощность P_1 передаваемая приводным двигателем генератору, преобразуется в генераторе в полезную электрическую мощность P_2, передаваемую нагрузке и мощность затрачиваемую на преодоление потерь ($P_о + P_{эа} + P_в$).

О свойствах генераторов и возможность их применения для того или иного привода судят по их основным характеристикам,

устанавливающим зависимости между основными величинами Такими основными величинами являются:

напряжение на зажимах генератора –U, В;

ток возбуждения –$I_в$, А ;

ток якоря или ток нагрузки –I, А;

частота вращения n или угловая скорость вращения ω;

Обычно снимают характеристики при n = const Основными характеристиками генераторов являются:

а) характеристика холостого хода — зависимость ЭДС на зажимах генератора в режиме холостого хода E от тока возбуждения $I_в$:

$$E = f(I_в) \text{ при } I = 0; \quad n = \text{const};$$

б) нагрузочная характеристика — зависимость напряжения на зажимах генератора U при работе с нагрузкой от тока возбуждения $I_в$:

$$U = f(I_в) \text{ при } I = \text{const}; \quad n = \text{const};$$

в) внешняя характеристика — зависимость напряжения на выходе генератора U от тока нагрузки I

$$U = f(I) \text{ при } n = \text{const}; \; R_{рг} = \text{const};$$

г) регулировочная характеристика — зависимость тока возбуждения $I_в$ от тока нагрузки I

$$I_в = f(I) \text{ при } U = \text{const}; \; n = \text{const}.$$

4.4. Генератор независимого возбуждения

Генераторы независимого возбуждения применяются в тяговом подвижном составе довольно широко. Это — тяговые генераторы постоянного тока тепловозов, тяговые двигатели локомотивов и электропоездов в режиме электрического торможения При электрическом торможении тяговые двигатели переводят в режим генератора — создается тормозной

электромагнитный момент, который реализуется в тормозную силу поезда.

4.4.1. *Характеристика холостого хода* $E_о = f(I_в)$ *при* $I = 0$ *и* $n = \text{const}$

Схема для снятия характеристики холостого хода представлена на рис. 4.3. Регулировочный реостат $R_{рг}$, включенный в цепь возбуждения, позволяет регулировать ток возбуждения в широких пределах. При снятии характеристики холостого хода рубильник S должен быть разомкнут, а щетки должны быть на геометрической нейтрали. Приводной двигатель ПД должен вращать генератор с номинальной частотой вращения. Уменьшаем сопротивление $R_{рг}$, увеличивается ток возбуждения $I_в$. Это приводит к увеличению МДС главных полюсов $F = I_в w$ и магнитного потока $Ф$, созданного этими полюсами Изменение магнитного потока Ф вызовет изменение ЭДС $E = C_м Фn$.

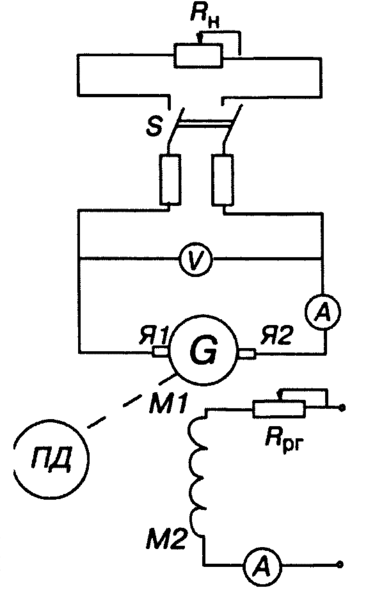


Рис. 4.3. Схема генератора независимого возбуждения

Это можно проследить по логической цепочке. Стрелка, направленная вниз ↓, означает уменьшение величины, вверх ↑ — увеличение, расположенная горизонтально → — без изменения

$$R_{рг}\downarrow \rightarrow I_в\uparrow \rightarrow F\uparrow \rightarrow Ф\uparrow \rightarrow E\uparrow.$$

Приведенная цепочка справедлива до магнитного насыщения машины. При достижении магнитного насыщения магнитный поток машины $Ф$ и ЭДС E, при увеличении $I_в$, не увеличиваются. Так как в машине всегда имеется остаточный магнетизм, то при $I = 0$ на зажимах генератора будет

ЭДС E_0 = OA, составляющая (2–3)% от номинального напряжения $U_н$ (рис. 4.4).

При ЭДС равной $1{,}15U_н$ уменьшают ток возбуждения до нулевого значения. Полученная таким путем кривая *2* проходит в первом квадранте выше кривой 1 вследствии возросшей величины остаточного магнетизма. Затем изменим направление тока возбуждения и постепенно увеличиваем его значение от 0 до минус $I_в$ = 06, то получим кривую *3*, которая совместно с кривой *2* образует гистерезисную петлю, определяющую свойства стали полюсов и ярма. Проведя между линиями *3* и *4* среднюю линиию *5*, получим так называемую расчетную характеристику холостого хода.

Вначале характеристика холостого хода представляет собой практически прямую линию. Это объясняется тем, что при малых токах возбуждения почти вся МДС идет на преодоление магнитным потоком воздушного зазора — среду с постоянной магнитной проницаемостью. В дальнейшем, по мере увеличения тока возбуждения $I_в$ и соответственно магнитного потока $Ф$ сталь машины начинает насыщаться, и поэтому получаем сначала средненасыщенную часть характеристики холостого хода, так называемое *колено кривой*, а затем сильнонасыщенную часть. Точка *K*, соответствующая номинальному напряжению $U_н$, обычно у тяговых электрических машинах лежит на колене кривой намагничивания. Это делают по следующим причинам — Во-первых расходуется меньше стали, а в тяговые машины при ограниченных габаритах необходимо вписать большую мощность. Во-вторых при работе машины на прямолинейной части кривой напряжение генератора неустойчиво. В третьих при работе машины на

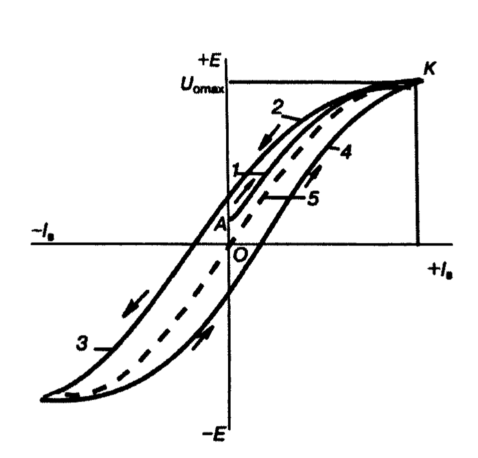


Рис. 4.4. Характеристика холостого хода генератора независимого возбуждения

насыщенной части кривой ограничивается возможность регулирования напряжения.

Таким образом, по характеристике холостого хода можно судить о насыщении магнитной цепи генератора при номинальном режиме работы.

4.4.2. *Нагрузочные характеристики* $U = f(I_в)$ *при* I=const *и* n = const

Для снятия нагрузочной характеристики приводят во вращение приводной двигатель и замыкают рубильник *S*. Затем поддерживая неизменными частоту вращения и ток якоря изменяют ток возбуждения, также как при снятии характеристики холостого хода, но снимают ее только в первом квадранте. Нагрузочная характеристика (кривая *2* на рис. 4.5, *а*) по виду схожа с характеристикой холостого хода и проходит несколько ниже этой характеристики вследствии падения напряжения в цепи якоря и размагничивающего действия реакции якоря

Нагрузочная и характеристика холостого хода построенные в одних осях координат позволяют построить так называемый характеристический треугольник. Посредством треугольника можно оценить влияние падения напряжения и реакции якоря на напряжение генератора, а также может быть использован для построения внешней и регулировочной характеристик генератора.

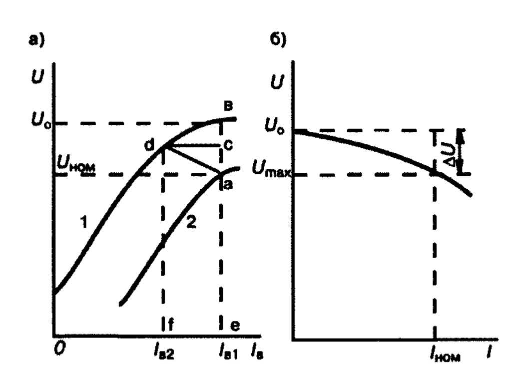


Рис. 4.5. Нагрузочная (а) и внешняя (б) характеристики генератора независимого возбуждения

Из точки *а*, соответствующей но

минальному напряжению $U_{ном}$ проводим вертикальную прямую до пересечения с характеристикой холостого хода — получим точку *b*. На отрезке *ab* откладываем точку *c*, причем отрезок *ac* равен падению напряжения $I_a R_a$. Затем из точки *c* проводим горизонтальную прямую до пересечения в точке *d* с характеристикой холостого хода, получим горизонтальный катет *cd* искомого треугольника *acd*. Отрезок *cb* соответствует размагничивающему действию реакции якоря.

Из точки *d* проводим вертикальную прямую до пересечения с осью абсцисс. Отрезок *fe*, равный разности токов возбуждения $I_{в1} - I_{в2}$, представляет собой ток возбуждения, компенсирующий размагничивающее действие реакции якоря.

Характеристический треугольник можно построить в любой точке нагрузочной характеристики. Отрезок *ac* будет постоянной длины, так как ток якоря неизменный, но сторона *cd* будет изменяться, так как изменяется степень насыщения магнитной цепи генератора, а следовательно, и размагничивающее действие реакции якоря.

4.4.3. Внешняя характеристика $U = f(I_в)$ при $I_в$=const

Внешняя характеристика (рис. 4.5, *б*) определяет зависимость напряжения генератора от нагрузки, когда ток вобуждения не регулируется.

Для снятия внешней характеристики генератор приводят во вращение до номинальной частоты вращения и нагружают его до номинального тока при номинальном напряжении. Затем, уменьшают ток до нуля (холостой ход), записывая показания приборов.

При переходе к холостому ходу (I = 0), напряжение возрастает на вполне определенную величину ΔU которая называется *номинальным изменением напряжения генератора*. В генераторах независимого возбуждения

$$\Delta U = ((U_о - U_{ном})/U_{ном})100\%.$$

Для генераторов независимого возбуждения U = 5–10%. Причины изменения напряжения при изменении тока нагрузки те же,

что и для нагрузочной характеристики: размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в обмотках якоря.

4.4.4. *Регулировочная характеристика генератора* $I_в = f(I)$ *при* $U = const$ *и* $n = const$

Регулировочная характеристика показывает как нужно регулировать ток возбуждения при изменении нагрузки, чтобы напряжение на его зажимах оставалось неизменным.

Для снятия показаний приборов (см. рис. 4.3) приводным двигателем приводят генератор во вращение до номинальной скорости. Изменяя ток возбуждения $I_в$ устанавливают номинальное напряжение на зажимах генератора. Затем замыкают рубильник S и увеличивают ток нагрузки. Напряжение будет падать, как это следует из внешней характеристики. Изменяя ток возбуждения поддерживают постоянным напряжение на зажимах. Увеличивая ток нагрузки I до номинального значения ($I = I_{ном}$), затем уменьшая его до холостого хода I=0, поддерживая неизменным напряжение получим две характеристики (рис. 4.6) — восходящую и нисходящую. Средняя кривая, проведенная между восходящей и нисходящей ветвями, считается практической регулировочной характеристикой.

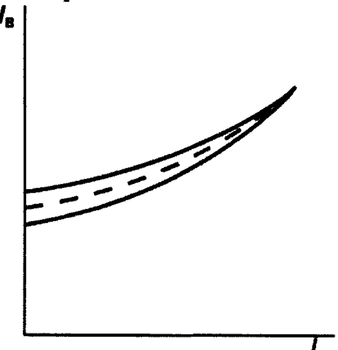


Рис. 4.6. Регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения

4.5. *Генератор параллельного возбуждения* $U = f(I_В)$ *при* $U = f(I)$ *и* $n = const$

Генератор с параллельным возбуждением относится к генераторам с самовозбуждением. Он не требует особого источника тока для питания обмотки возбуждения и создает в пределах номинальной нагрузки довольно устойчивое напряжение. На тяговом подвижном составе подобные

генераторы применяют в качестве генераторов управления электровозов и электропоездов, вспомогательных генераторов тепловозов и др.

4.5.1. Условия самовозбуждения и характеристика холостого хода

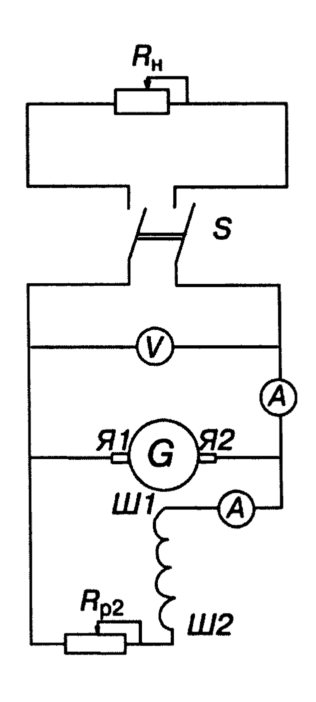


Рис. 4.7. Схема генератора параллельного возбуждения

На рис. 4.7 показана схема генератора с параллельным возбуждением. Из схемы видно, что для того чтобы при разомкнутом рубильнике S по обмотке возбуждения протекал ток и создавался основной магнитный поток главных полюсов необходимо напряжение — ЭДС обмотки якоря. Но, ЭДС в обмотке якоря будет индуктироваться лишь в том случае, если будет магнитный поток главных полюсов. Получается замкнутый круг — ЭДС будет индуктироваться лишь в том случае, если будет магнитный поток главных полюсов: магнитный поток появится, если ЭДС создаст ток возбуждения. Поэтому для того чтобы генераторы с самовозбуждением могли нормально работать необходимо соблюдать определенные условия самовозбуждения: наличие остаточного магнитного потока главных полюсов; правильное подключение концов обмотки возбуждения к обмотке якоря; сопротивление цепи возбуждения должно быть ниже некоторого критического значения; частота вращения якоря должна быть выше критической. Для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы в нем был небольшой (2–3% от нормального) остаточный магнитный поток. В уже работавшей машине практически всегда присутствует магнитный поток такого значения $\Phi_{ос}$. Вновь изготовленную

машину, которая по каким-то причинам размагнитилась, следует намагнитить, пропустив ток по обмотке возбуждения. На ТПС этим источником тока может быть аккумуляторная батарея.

Процесс самовозбуждения протекает следующим образом. Небольшая ЭДС, индуктированная в обмотке якоря магнитным потоком, создает малый ток $I_в$ в обмотке возбуждения. Ток $I_в$ увеличивает магнитный поток главных полюсов, а следовательно, происходит увеличение ЭДС и тд Этот процесс самовозбуждения продолжается до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет установившегося значения.

Если полярность подключения обмоток возбуждения и обмоток якоря неправильна, то происходит не усиление магнитного потока, а его ослабление, так как возбуждение будет не увеличивать, а уменьшать магнитный поток до нулевого значения. В этом случае необходимо переключить концы обмотки возбуждения или изменить направление вращения

На рис. 4.8 показана характеристика холостого хода (кривая *1*); прямая *2* — зависимость падения напряжения от тока возбуждения $I_в R_в = f(I_в)$, представляющая собой прямую, идущую под углом α оси абсцисс, так как $R_в$ = const

$$\mathrm{tg}\alpha = I_в R_в / I_в = R_в.$$

В этом случае, каждому значению $I_в R_в$ соответствует особая прямая, выходящая из начала координат под углом α.

Точка пересечения *А* кривой *1* и прямой *2* соответствует окончанию процесса сомовозбуждения.

Если увеличивать сопротивление $R_в$, т.е. угол α, то точка *А* будет скользить по характеристике холостого хода в направлении к точке *О*, и в конце концов станет касательной к характеристике холостого хода. Это сопротивление называют критическим $R_{Вкр}$.

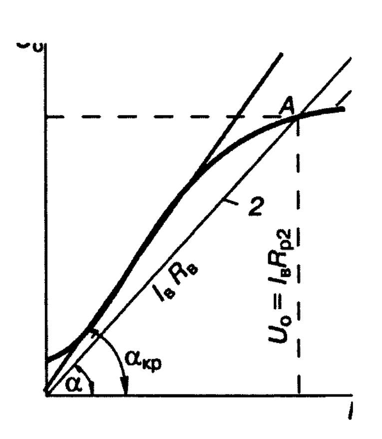


Рис. 4.8. Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения

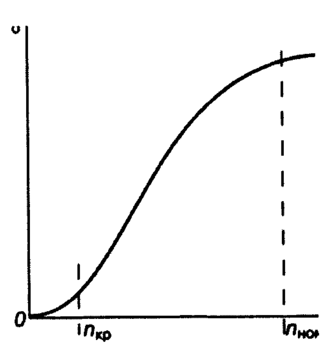


Рис. 4.9. Характеристика самовозбуждения

Самовозбуждение зависит от частоты вращения генератора. Из формулы $E = C_e Фn$, следует, что при $n = 0$ $E = 0$.

Если снять и построить зависимость $E = f(n)$ генератора параллельного возбуждения (рис. 4.9) — представляющую собой характеристику самовозбуждения, то из нее следует, что для каждого значения частоты вращения $n = n_{кр}$, ниже которого самовозбуждение невозможно. Такое значение $n = n_{кр}$ называют *критической частотой вращения*. Процесс самовозбуждения будет начинаться при $n > n_{кр}$ В этом случае происходит увеличение напряжения.

Критическая частота вращения зависит от сопротивления цепи возбуждения и с увеличением последнего возрастает.

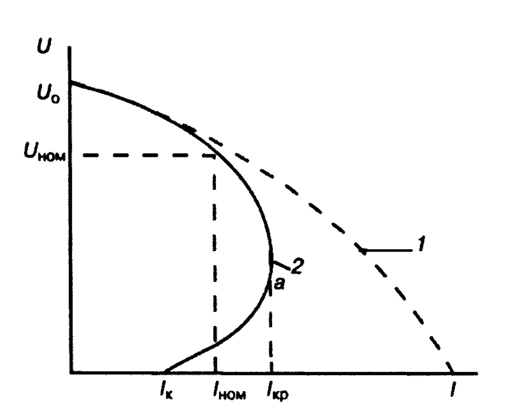
Характеристика холостого хода $U = f(I_В)$ при $U = f(I)$ и $n=$ const генератора параллельного возбуждения может быть снята только в одном квадранте, так как самовозбуждается лишь в одном направлении.

4.5.2. *Внешняя характеристика* $U=f(I)$ *при* $R_а$ = const *и* n = const

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения более крутая, чем у генератора с независимым возбуждением. Объясняется это тремя причинами. Первые две те же, что у генератора с независимым возбуждением (размагничивающее действие реакции якоря и падение напряжения в обмотках якоря). Третья причина — уменьшение тока возбуждения $I_в$, из-за уменьшения величины магнитного потока $Ф$, вследствии чего индуктированная этим потоком ЭДС — уменьшается.

Поэтому номинальное изменение напряжения у генератора параллельного возбуждения больше и составляет U = 10–30 %.

Если продолжать увеличение тока нагрузки, то будет происходить уменьшение напряжения. Однако при некотором максимальном значении тока $I = I_{max}$ (точка *а*, рис. 4.10) характеристика делает петлю и приходит в точку *б* на оси абсцисс. Это объясняется следующим образом. При уменьшении сопротивления $R_н$ ток I растет, но указанные выше три причины, вызывающие падение напряжения на зажимах генератора, действуют в противоположном направлении. В дальнейшем третья причина становится преобладающей, так как из-за падения напряжения ток возбуждения уменьшается, следовательно магнитный поток $Ф$ также уменьшается и магнитная цепь становится менее насыщенной. Затем машина переходит во все более ненасыщенное состояние (прямолинейная часть характеристики холостого хода), при этом начиная с точки *а*, дальнейшее уменьшение сопротивления нагрузки $R_н$ вызывает не увеличение тока нагрузки, а его уменьшение, так как U падает быстрее $R_н$. Ток I достигнув значения $I_к$ — меньше номинального тока нагрузки $I_н$, так как определяется только потоком остаточного намагничивания $I_{кр}$ превышает номинальное значение в 2–2,5 раза. Если такое значение тока не вызовет круговой огонь по коллектору или повреждение изоляции, то такой ток не опасен для генератора.



4.10. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения

Характеристика (кривая 1, рис. 4.10) получается при постепенном уменьшении сопротивления $R_н$. Однако в реальных эксплуатационных условиях возможно *так называемое внезапное короткое замыкание,* при котором магнитная система маши

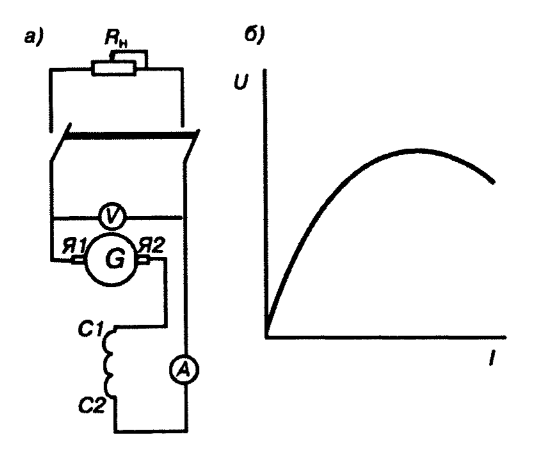
ны не успевает размагнититься, и ток $I_к$ достигает опасных для машины значений (8–18) $I_н$ (кривая 2, рис. 4.10) При таком резком изменении тока на валу генератора возникает значительный тормозящий момент, а на коллекторе появится сильное искрение, которое может перейти в круговой огонь. Следовательно, внезапное короткое замыкание генераторов параллельного возбуждения, особенно большой мощности, является опасным, и поэтому такие генераторы нужно защитить от перегрузки и короткого замыкания. Для защиты генераторов параллельного возбуждения на тяговом подвижном составе применяют плавкие предохранители, а в некоторые случаях релейную защиту. Это более подробно рассмотрено в курсе «Электрические аппараты и цепи».

Регулировочная характеристика $I_в = f(I)$ при U = const и n = const практически не отличается от соответствующей характеристики генератора с независимым возбуждением.

4.6. *Генератор последовательного возбуждения*

Тяговые двигатели имеющие последовательное возбуждение, при электрическом торможении переводят в режим генератора. Тормозной электромагнитный момент генератора преобразуется в тормозную силу поезда, Рассмотрим работу генератора с последовательным возбуждением. Его схема приведена на рис. 4.11, *а*. В генераторе $I_в = I_а = I$ и поэтому при n = const имеются только две независимые переменные: U и I. Вследствие этого генератор имеет только одну характеристику, а именно внешнюю $U = f(I)$ при n = const (рис. 4.11, *б*). Характеристики холостого хода, нагрузочную и другие можно снять только по схеме генератора с независимым возбуждением.

Так как напряжение генератора на зажимах не стабильно и сильно меняется с изменением нагрузки, то он не пригоден для питания потребителей. При электрическом торможении нестабильным будет тормозной момент, а следовательн и тормозная сила поезда. По этой причине тяговые электродвигатели при электрическом торможении переключают в режим генератора с независимым возбуждением.



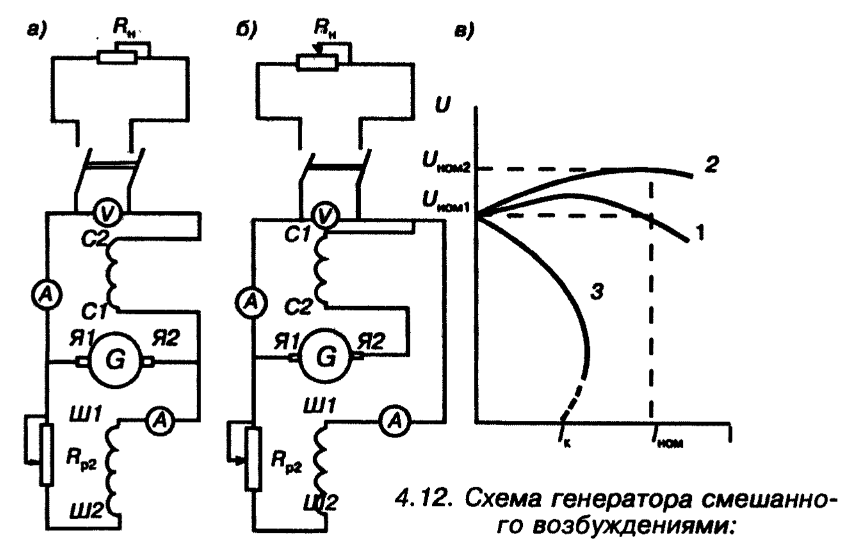
4.11. Схема генератора последовательного возбуждения (а) и его внешняя характеристика (б)

4.7. Генератор смешанного возбуждения

Каждый главный полюс генератора смешанного возбуждения имеет по две обмотки. Одна из обмоток выполнена проводом малого сечения с большим количеством витков и включена параллельно якорю, а другая обмотка выполнена проводом такого же сечения как обмотка якоря и имеет малое число витков — соединена последовательно с якорем. Магнитные потоки, созданные этими обмотками (параллельной и последовательной) могут быть направлены в одну сторону — согласное включение, или в противоположные стороны — встречное включение Схема генератора может быть выполнена с коротким шунтом (рис. 4.12, *а*), или с длинным шунтом (рис. 4.12, *б*) Разницы между этими схемами практически нет, так как сопротивление последовательной обмотки небольшое и падение напряжения на ее зажимах очень мало.

Снятие внешней, регулировочной и нагрузочной характеристик генератора смешанного возбуждения производят также, как у генератора параллельного возбуждения.

В режиме холостого хода генератор смешанного возбуждения работает как генератор параллельного возбуждения, так как ток



4.12. Схема генератора смешанного возбуждениями:

а — с коротким шунтом; б — с удлиненным шунтом; в — внешние характеристики

последовательной обмотки возбуждения при коротком шунте равен нулю, а при длинном — ничтожно мал.

Внешняя характеристика при согласном включении жесткая (см. рис. 4.12, кривая *1*), т.е. напряжение на зажимах генератора при увеличении тока почти не изменяется. Изменяя число витков последовательной обмотки возбуждения можно изменять положение кривой внешней характеристики. Так увеличивая число витков последовательиой обмотки возбуждения можно получить внешнюю характеристику, у которой с увеличением тока увеличивается напряжение (см. рис. 4.12, кривая *2*).

При встречном включении обмоток возбуждения их МДС вычитаются (так как направлены встречно), поэтому внешняя характеристика будет крутопадающей (см. рис. 4.12, кривая *3*)

Встречное включение обмоток возбуждения применяется в некоторых типах сварочных генераторов, так как их режим работы близок к режиму короткого замыкания. Согласное включеиие обмоток воэбуждения применяется в тех случаях, когда нужно автоматически поддерживать стабильное напряжение на зажимах генератора, независимо от тока нагрузки.

Контрольные вопросы

1. Какие моменты действуют в генераторах постоянного тока?
2. Какие характеристики определяют свойства генераторов постоянного тока?
3. Каковы условия самовозбужденния генераторов постоянного тока?
4. Почему генератор с последовательным возбуждением практически не применяется в тяговом подвижном составе?
5. Что такое «встречное» и «согласное» включение обмоток вожбуждения?

Глава 5.

Тяговые генераторы постоянного тока

5.1. *Краткие сведения о передачах мощности*

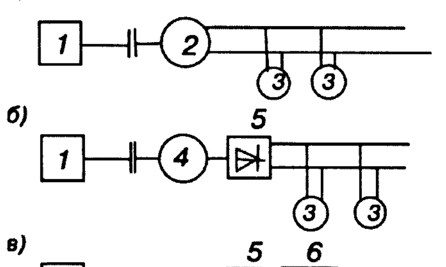
Коленчатый вал дизеля тепловоза не соединяют непосредственно с колесной парой, так как тепловоз был бы практически неработоспособным. Из курса «Энергоустановки» известно, что нагружать дизель можно при частоте вращения коленчатого вала коленчатого вала, равной, примерно, 1/3 номинального значения. По этой причине без дополнительных устройств тепловоз не сможет тронуться с места. Поэтому при передаче мощности от дизеля к колесным парам применяют комплекс устройств, называемых *передачей мощности.* К передачам мощности предъявляют ряд требований. Основное из них, это — наиболее полное использование мощности дизеля при ведении поезда. На тепловозах применяют три вида передач мощности: электрическая, гидравлическая и механическая. Наибольшее распространение получила электрическая передача. Электрические передачи мощности в свою очередь бывают постоянного, переменно-постоянного и переменного тока.

Электрическая передача (рис. 5.1, *а*) постоянного тока состоит из дизеля *1*, который приводит во вращение тяговый генератор постоянного тока *2*. Тяговый генератор вырабатывает электроэнергию и питает ею тяговые двигатели 3, приводящие в движение тепловоз. Кроме того, имеются электрические аппараты и вспомогательные машины, образующие электрические схемы и обеспечивающие нормальное функционирование тепловоза в эксплуатации.

В электрической передаче переменно-постоянного тока (рис. 5.1, *б*) вместо генератора постоянного тока используют трехфазный синхронный генератор *4*, переменное напряжение которого подведено к выпрямительной установке *5*, где переменный ток преобразуется в постоянный. Постоянный ток подведен к тяговым электродвигателям постоянного тока *3*.

Электрическая передача переменного тока (рис.5, *в*) исполь-





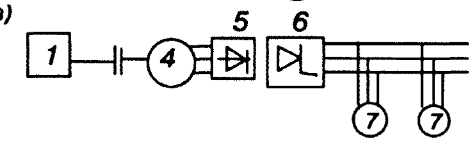


Рис. 5.1. Схемы передачи мощности:

а — на постоянном токе; б — на переменно-постоянном; в — на переменном токе; 1 — дизель; 2 — генератор постоянного тока; 3 — тяговые двигатели постоянного тока; 4 — синхронный генератор; 5 — выпрямитель; 6 — инвертор; 7 — двигатели переменного тока

зует в качестве тягового генератора трехфазный синхронный генератор *4*, а в качестве тяговых электродвигателей — синхронные или асинхронные двигатели *7*. Для регулирования частоты вращения тяговых двигателей применяют преобразователь частоты, содержащий выпрямительную установку *5* и тиристорный инвертор *6*, преобразующий постоянный ток в трехфазный переменный с регулируемой частотой.

5.2. Регулирование напряжения тяговых генераторов постоянного тока

Изменяя частоту вращения дизеля можно регулировать его мощность. Необходимо, чтобы мощность дизеля оставалась постоянной при изменении нагрузки. Постоянство мощности легко достигается с помощью электрической передачи. Мощность тягового генератора $P_г$ определяется по формуле:

$$P_г = UI , \qquad (5.1)$$

где U — напряжение генератора, В;

I — ток генератора, А.

Поезд осуществляет движение по переменному профилю пути: подъемы, спуски и площадки непрерывно чередуются. Следовательно, непрерывно меняется нагрузка на локомотив, и как следствие, происходит изменение нагрузки на тяговые двигатели. А величиной, определяющей нагрузки электродвигателей, как и любой электрической цепи, является ток. Так как профиль пути меняется, то будет менятся и величина тока двигателей. Для обеспечения постоянства мощности необходимо чтобы произведение тока на напряжение в формуле (5.1) было величиной постоянной. Из математики известно, что такой кривой, которая обеспечивает постоянство произведения, является равнобокая гипербола. Генераторы, рассматриваемые в главе 4, не имеют естественную внешнюю характеристику в виде гиперболы. Поэтому на локомотивах применяют генераторы с независимым возбуждением, а гиперболическая внешняя характеристика обеспечивается системой автоматического регулирования генератора (СВГ). Для этой цели применяют специальные возбудители (электрические машины, преназначенные для питания независимой обмотки возбуждения тягового генератора), магнитные усилители или полупроводниковые элементы.

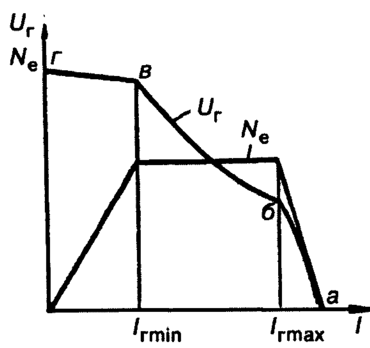


Рис. 5.2. Внешняя характеристика тягового генератора и изменение мощности дизеля $N_е$:

аб — зона ограничения по току; бв — зона использования полной мощности дизеля; вг — зона ограничения но напряжению (возбуждению)

Характеристика тягового генератора имеет ограничение по току (рис. 5.2, участок *аб*). Участок *аб* также характеризуется большими токами и низкими напряжениями генератора. Участок *бв* — это зона использования полной мощности дизеля. Участок *вг* — автоматическое ограничение напряжения тягового генератора при больших скоростях движения, что позволяет защитить электрические силовые цепи тепловоза и уменьшить габаритные размеры генератора.

Каждой позиции контроллера соответствует своя внешняя характеристика. Обычно контроллер имеет 8–15 характеристик.

5.3. Условия работы тяговых генераторов тепловоза

Тяговые генераторы тепловозов по сравнению с общепромышленными работают в тяжелейших условиях. Это — повышенная вибрация, многократные и одиночные удары, резкое изменение температуры (на 20–30^{0}C в течение 2–3ч), выпадение росы, работа в запыленном или влажном воздухе, при высоте до 1200 м над уровнем моря, при температуре окружающего воздуха от –50 до +40^{0}C. Эти обстоятельства учитывают при расчете, конструировании, разработке и технологии изготовления тяговых генераторов тепловозов. Требования, которым должны соответствовать электрические машины подвижного состава, определены стандартом ГОСТ2582-81 «Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия». Из-за ограниченных габаритов мощность тяговых машин на единицу массы и объема по сравнению с машинами общепромышленного применения значительно выше. В то же время их надежность и безотказность должны быть очень высокими, так как эти показатели существенно влияют на безопасность движения поездов.

5.4. Устройство тяговых генераторов постоянного тока

5.4.1. Общие сведения

Технические данные тяговых генераторов постоянного тока приведены в прил. 1.

Тяговые генераторы преобразуют механическую энергию дизеля в электрическую, которая используется для питания тяговых электродвигателей (ТЭД) тепловозов. В кратковременных режимах тяговые генераторы постоянного тока, имеющие специальную пусковую обмотку возбуждения, используются в качестве электродвигателей для запуска дизеля с питанием их от аккумуляторной батареи.

На рис. 5.3 изображен общий вид генератора ГП 311Б с габаритными и установочными размерами.

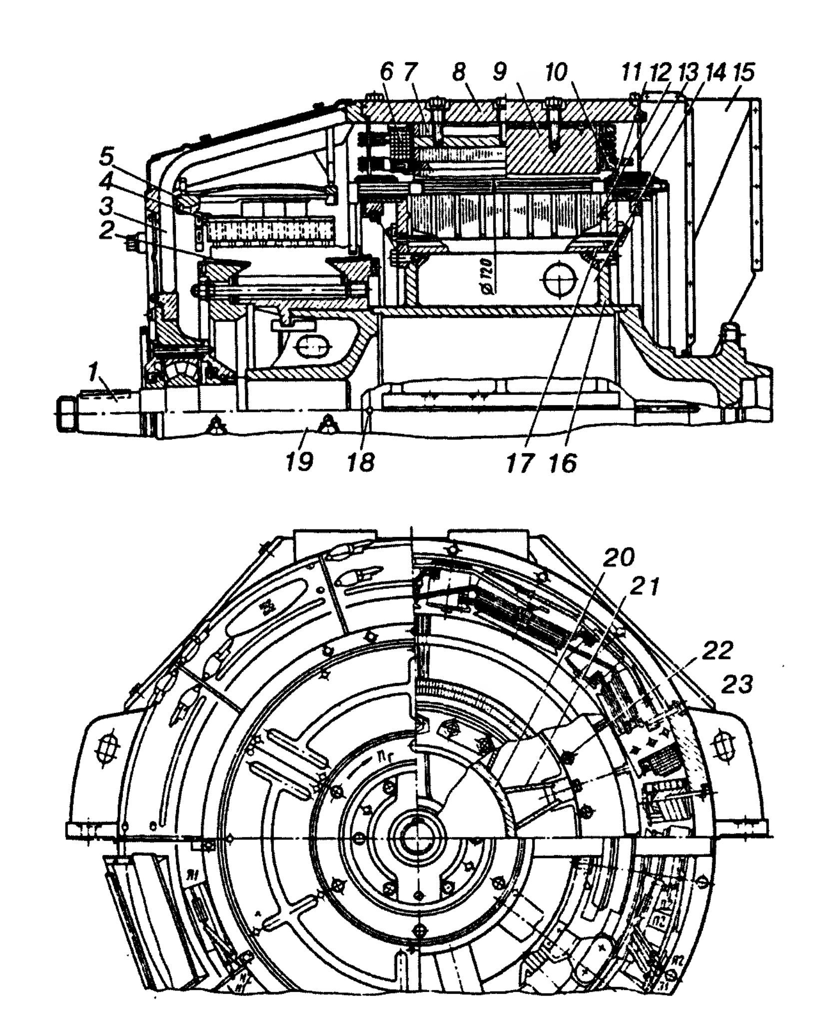


Рис. 5.3. Тяговый генератор ГП-311Б:

1 — вал; 2 — коллектор; 3 — подшипниковый щит; 4 — щеткодержатель; 5 — поворотная верса 6, 7— катушка и сердечник главного полюса; 8 — станина; 9, 10 — сердечник и катушка добавочного полюса; 11 — обмотка якоря; 12 — сердечник якоря; 13 — диафрагма; 14 — корпус якоря; 15 — входной патрубок; 16 — диски; 17— клиновые шпонки; 18 — штифт для фиксации щита со станиной; 19 — крышка; 20 — барабан; 21 — продольные ребра: 22 — шпильки; 23 — стержень

Поперечный и продольный разрезы см. рис. 5.3. Как указывалось в гл. 3 станина является частью магнитной цепи машины и изготовляется из толстолистового проката с малым содержанием углерода. К станине приварены две лапы, с помощью которых она опирается на поддизельную раму. Каждая лапа имеет по четыре отверстия для болтов крепления с поддизельной рамой и два отверстия с резьбой для отжимных болтов. С торцов станина закрыта подшипниковым щитом и патрубком. К внутренней части станины прикреплены десять главных и десять добавочных полюсов.

5.4..2. Главные полюса

Сердечник главного полюса изготовлен из отдельных листов холоднокатанной электротехнической стали марки 3411 толщиной 1 мм. Листы изолированы друг от друга лаком, спрессованы и стянуты заклепками. В сердечнике выштамповано отверстие, куда запрессован стержень.В стержне сделаны три резьбовых отверстия для крепления полюса к станине.

Каждый главный полюс имеет по две катушки возбуждения (рис.5.4) — независимую и пусковую. Независимая обмотка содержит 105 витков медного провода размером 4×8 мм с изоляцией класса Н. Катушки расположены на каркасе *6*, имеющий отогнутые бурты, удерживающие рамки *1* и *3*. Каркас изготовлен из теплостойкой пластмассы. Изоляция каркаса состоит из четырех слоев гибкого стекломиканита на кремнийорганическом лаке и одного слоя стеклоленты.

Пусковая обмотка *5* расположена у полюсного наконечника и имеет три витка, которые выполнены медным проводом 6×30 мм с изоляцией класса Н. Между пусковой *5* и независимой *4* обмотками расположена стеклотекстолитовая шайба *2*.

Витковая изоляция пусковой обмотки состоит из асбестовой электроизоляционной бумаги, пропитанной в лаке ЭФ-3, затем катушку покрывают стеклолентой, пропитанной тем же лаком. Готовую катушку пропитывают кремнийорганическим лаком К-47 окунанием.

Каждый слой независимой обмотки промазан кремний органическим лаком или компаундом К-47. Пустоты заполняют замазкой П-11. Катушка пропитана лаком К-47К, который запекают и покрывают эмалью ГФ.

Катушки северного и южного полюсов унифицированы, так как имеют одинаковую конструкцию. Для обеспечения чередования полярности полюсов выводы катушек делают с прямыми и перекрещенными соединениями (рис. 5.4, *б*).

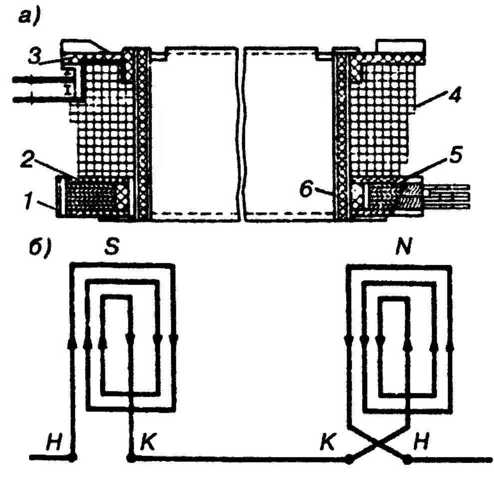


Рис. 5.4. Главный полюс:

а — катушка; б — схема намотки катушек; н — начало; к — конец; 1, 3 — удерживающие рамки; 2 — изоляционная шайба; 4 — независимая катушка возбуждения; 5 — пусковая обмотка; 6 — каркас

5.4.3. Добавочные полюсы

Сердечник *6* (рис. 5.5) добавочных полюсов изготовлен из конструкционной стали Ст3. Катушка удерживается на сердечнике угольниками *5*, выполненным из диамагнитного материала: дюралюминия или латуни. Благодаря этому уменьшается рассеивание магнитного потока. Как указывалось выше, магнитный поток добавочных полюсов должен быть направлен только в коммутируемую секцию. Между катушкой *3* и угольником расположена изоляционная рамка *4*. Сердечник полюса изолирован или стеклотканью на эпоксидной смоле или опрессованным и спеченным миканитом. Катушка содержит шесть витков медного провода размером 16×25 мм. Крайние витки изолированы двумя

слоями микаленты и одним слоем стеклоленты. Между витками уложены стеклотекстолитовые прокладки. Готовую катушку покрывают эмалью ГФ-92. Полюс в сборе пропитывают в термореактивном лаке и запекают. Между станиной и сердечником помещают диамагнитную прокладку *2*, выполненную из текстолита, предназначенную для уменьшения насыщения сердечника добавочного полюса. Для регулирования воздушного зазора между якорем и полюсным наконечником при настройке коммутации между станиной и сердечником помещают набор из шести стальных прокладок общей толщиной 3 мм.

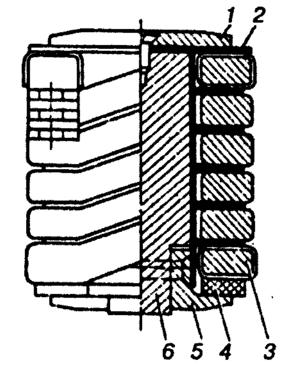


Рис. 5.5. Добавочный полюс:

1 — стольная накладка; 2 — текстолитая прокладка; 3 — катушка; 4 — изоляционная рамка; 5 — диамагнитный угольник; 6 — сердечник

5.4.4. Траверса и щеткодержатели

Щеткодержатели применяемые в тяговом генераторе, бывают двух видов: наклонные (реактивные) и радиальные. На первых выпусках генераторов (до 1979 г.) применялись реактивные щеткодержатели (рис. 5.6, *а*). В этих щеткодержателях набегающая щетка имеет наклон 30^0 к радиусу коллектора, а сбегающая — 10^0. Такая конструкция щеткодержателя уменьшает потери на трение щетки в корпусе. Корпус щеткодержателя отлит из кремнистой латуни.

Радиальный щеткодержатель имеет одно гнездо (рис. 5.6, *б*), в котором устанавливают разрезную щетку с резиновым амортизатором (накладкой) толщиной 12 мм. Амортизатор имеет прямоугольный выступ, входящий в соответствующий паз на верхнем торце щетки. Благодаря амортизаторам увеличивается срок службы щеток, улучшается коммутация и ликвидируются отколы ще-

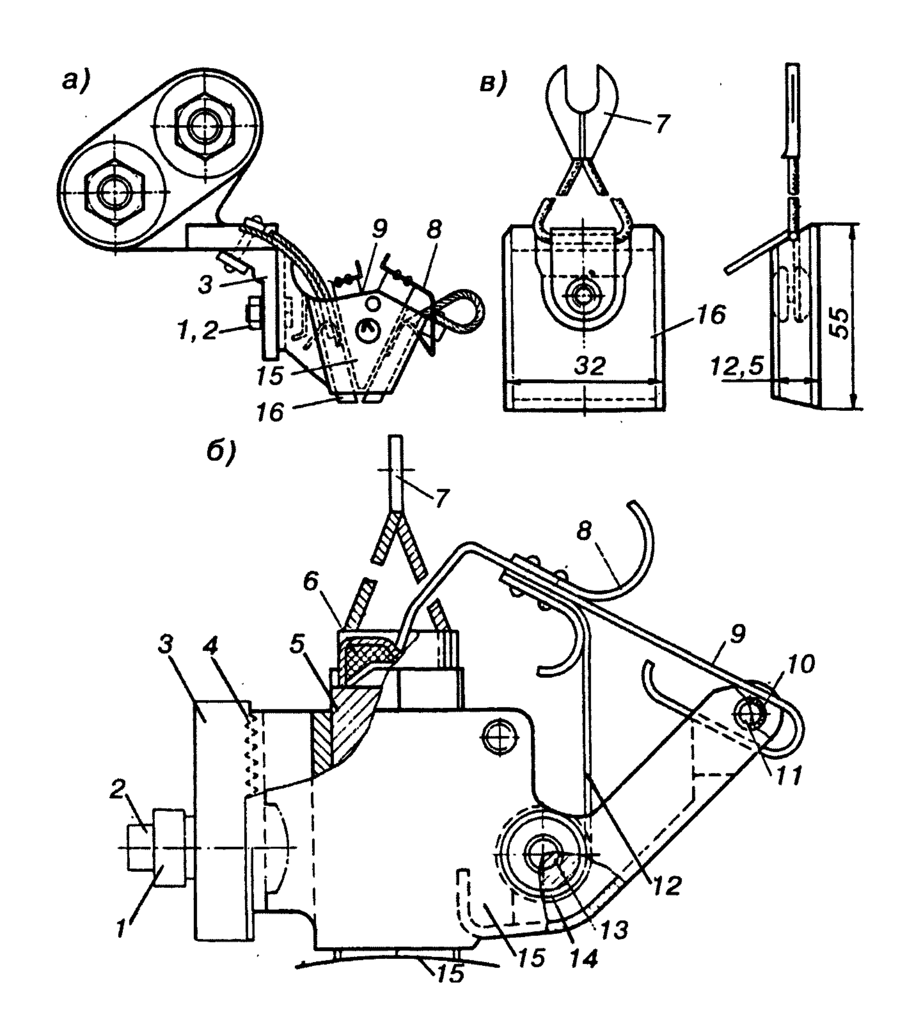


Рис. 5.6. Щеткодержатели:

а — наклонный; б — радиальный; в — щетка наклонная: 1 — гайка; 2 — болт крепления щеткодержателя; 3 —бракет (кронштейн); 4 — рифленая привалочная поверхность корпуса; 5 — щетка разрезная; 6 —резиновая накладка; 7 — наконечник открытого типа; 8 — скоба (курок); 9 — рычаг; 10, 14 — втулки; 11, 13 — оси; 12 — пружина; 15—корпус; 16 — щетка наклонная

ток. Щетка марки ЭГ-74 имеет размер 12,5×32×65/60 мм. Нажатие на щетку обеспечивается спиральными пружинами через курки. Изменяя затяжку пружины, регулируют силу нажатия, которая должна быть 8–12 Н. Между щеткодержателем и коллектором должен быть зазор 2–3 мм. Данный зазор регулируют прорезью в корпусе щеткодержателя под болтом *2* и использованием гребенчатых (рифленых) привалочных поверхностей щеткодержателя. Щеткодержатели крепят к бракету *3*. На каждом бракете укреплено по девять щеткодержателей. Бракет *3* отлит из алюминиевого сплава, и крепится к поворотной траверсе двумя изоляционными подвесками, изготовленными из микалекса, армированного специальным болтом с одной стороны и гайкой с другой. Бракетов со щеткодержателями столько сколько главных полюсов, т.е. пять положительной полярности и пять отрицательной. Отрицательные также как и положительные соединены отдельными собирательными шинами. Бракеты располагают таким образом чтобы оси щеток находились на нейтрали. Бракеты крепят к поворотной траверсе. Траверса представляет собой легкую конструкцию из двух колец, соединенных ребрами по числу полюсов, к которым прикреплены бракеты. На наружней стороне колец нарезаны зубья. Траверсу можно поворачивать на угол 360^0. Для привода траверсы на подшипниковом щите установлена шестерня, имеющая зацепление с траверсой. Поворот траверсы осуществляется при помощи валоповоротного устройства дизеля.

5.4.5. Подшипниковый щит

Подшипниковый щит воспринимает большие усилия. Чтобы не допускать вибрации и смещения щеткодержателей, щит имеет сварную конструкцию, состоящую из ребер и колец. Ребра наклонены к оси машины, что обеспечивает жесткость и легкость конструкции. В центральной части щита образуется кольцо, к которому крепится крышка. Такая конструкция позволяет снять крышку и заменить подшипник без снятия подшипникового щита.

У генераторов без траверсы (например, тепловозы ТЭМ-2), бракеты крепят к подшипниковым щитам, которые имеют

овальные отверстия под болты крепления щита, позволяющие поворачивать его и устанавливать щетки на нейтрали.

Вал якоря в генераторе опирается на один подшипник, находящийся в подшипниковым щите. Другой конец вала генератора соединен с коленчатым валом дизеля и опирается на него.

Патрубок *15* для подвода охлаждающего воздуха к генератору выполнен сварным из тонколистовой стали и имеет разъемы по вертикальной и горизонтальной осям. Он также является щитом, закрывающим детали генератора со стороны дизеля.

5.4.6. Якорь

В тяговом генераторе ГП-311Б применяют так называемую «безвальную конструкцию», т. е. применен полувал, конец каторого запрессован в барабан, состоящий из переднего и заднего фланцев, соединенных между собой продольными и поперечными ребрами. Задний фланец используют для соединения с валом дизеля, а передний — для напрессовки коллектора. Сердечник якоря состоит из пяти штампованных сегментов, стянутых шпильками в осевом направлении. В радиальном направлении сердечник закреплен встречными шпонками *17*, закладываемыми в пазы сегментов и ребер.

В нагретом состоянии сердечника встречно закладывают клиновые шпонки *17* в пазы сегментов и ребер. Этим обеспечивается натяг между сердечником и корпусом. Для образования радиальных каналов в осевом направлении сердечник разделен вентиляционными распорками на восемь пакетов. В сердечнике якоря выштамповано 155 пазов для укладки обмотки якоря.

Обмотка якоря сложная петлевая — двухходовая. Первые выпуски генераторов имели комбинированную обмотки. Однако ей присущи недостатки, указанные в гл. 2. Схема простой петлевой симметричной ступенчатой обмотки якоря генератора ГП-300Б показана на рис. 5.7, *а*. Катушка обмотки состоит из пяти элементарных одновитковых секций (рис. 5.7, *б*). В каждом пазу якоря уложены 30 стержней (пять рядов по шесть стержней) из шинной меди сечением 2,83×6,5 мм.

Корпусная изоляция якорной обмотки выполнена тремя слоями стеклослюдянитовой ленты ЛСПЭ-934-ТП и одним слоем стеклоленты ЛЭС вполуперекрышу, кроме того паз

выстлан пленочной стеклотканью. Каждый проводник изолирован одним слоем слюдянитовой ленты ЛС (вполуперекрышу), а все шесть проводников изолированы стеклолентой ЛСЭ, пропитанной в лаке КО-916К. Обмотка якоря удерживается в пазах текстолитовыми клиньями, под которые кладут электроизоляционный картон. После укладки в пазы якоря обмотку пропитывают в изоляционном лаке вакуумнагнетательным способом и запекают для обеспечения монолитности конструкции. Уравнительные соединения выполнены из меди ПММ 1,32×6,3 мм.

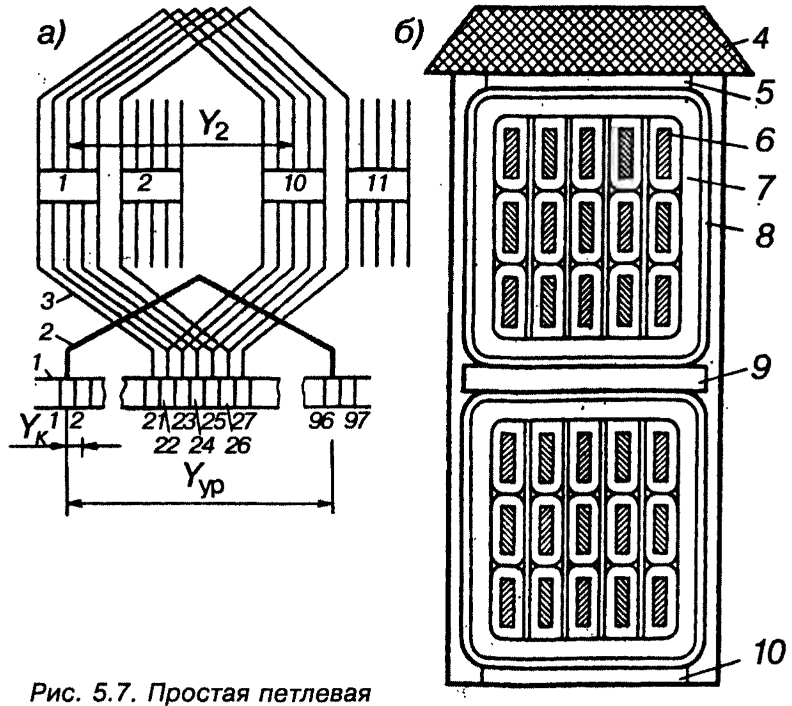


Рис. 5.7. Простая петлевая обмотка якоря ГП-300Б:

а — схема обмотки; б — разрез обмотки в пазу: 1 — пластины коллектора; 2 — уравнительные соединения; 3 — секция обмотки якоря; 4 — клин изолитовый; 5, 9, 10 — миканитовые прокладки; 6 — медный провод в гильзе; 7 — стеклянная лента; 8 — миткалевая лента

5.4.7. *Коллектор*

Коллектор генератора ГП-311Б собран из 465 пластин твердотянутой коллекторной меди с присадкой серебра от 0,07 до 0,14% или кадмия. Присадки увеличивают износоустойчивость коллектора. Пластины изолированы друг от друга миканитовыми прокладками толщиной 1 мм. Нижняя часть пластин коллектора имеет форму «ласточкина хвоста» с помощью которого закреплен стальными конусными нажимными шайбами. Между конусными шайбами и коллекторными пластинами помещена миканитовая манжета толщиной 1 мм на глифталевом лаке. Выступающую часть манжеты предохраняют от повреждения бандажом и покрывают, как и торцовые части пластин, изоляционной эмалью. Для предотвращения попадания влаги под коллекторные пластины уплотняют места посадки нажимной шайбы на корпус коллектора с помощью пропитанного шнура и промазки стыка снаружи густыми цинковыми белилами. Коллектор стянут 18 шпильками из легированной стали, термически обработанными для достижения высокой прочности и вязкости.

Сами коллекторные пластины выполнены сборными с ленточными петушками, которые припаивают твердым припоем к пластине. Для уменьшения массы пластин в них сделаны отверстия.

Коллектор обтачивают и шлифуют после сборки с якорем.

5.5. *Электробезопасность при обслуживании тяговых электрических машин*

Обслуживать и ремонтировать электрические машины ТПС может только персонал, после специального обучения в учебных заведениях, имеющих лицензию на данный вид деятельности. К работе допускаются лица только после сдачи экзамена по технике безопасности и после присвоения соответствующей группы по электробезопасности.

При техническом обслуживании и ремонте электрических машин ТПС на работников могут воздействовать следующие опасные и вредные производственные факторы установленные ГОСТ 12.0.003-74,как то:

движущийся подвижной состав и транспортные средства;

вращающиеся части электрических машин и другого оборудования;

повышенное значение напряжения электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;

повышенные уровни шума и вибраций на рабочем месте;

недостаточная освещенность рабочей зоны.

Все работы на электрических машинах должны выполняться в строгом соответствии с правилами ремонта электрических машин. На тепловозах должен быть остановлен дизель, а на электровозах ремонтные работы выполняются только при опущенном токоприемнике и разряженных конденсаторах, включенных в силовую цепь. Разряжать конденсаторы следует только заземляющей штангой, находящейся в кузовах электровозов переменного тока.

Перед снятием крышек или защитных кожухов с монтажносмотровых и других люков электрических машин необходимо убедиться, что они не находятся под напряжением.

Внешние электрические сети питания переносных диагностических приборов напряжением более 42 В переменного тока или 110 В постоянного тока должны быть оборудованы защитным заземлением («занулением» или устройством защитного отключения).

При обточке и шлифовке коллектора тягового генератора тепловоза не должны выполняться работы, связанные с ремонтом дизеля и электрического оборудования.

Измерение сопротивления изоляции, контроль нагрева подшипников, проверка состояния электрощеточного механизма должны производиться после отключения напряжения и полном остановки вращения якоря.

Пересоединение на зажимах испытуемых машин и аппаратов должно производится после отключения всех источников питания и полной остановки вращающихся деталей.

При проверке щеток на искрение необходимо использовать защитные очки.

В местах проведения ремонта и испытаний электрических машин должны быть вывешены соответствующие предупредительные и инструктивные указания по безопасному выполнению работ.

Контрольные вопросы

1. Какие изоляционные материалы применяют при изготовлении коллектора?
2. Что делают чтобы внутренние части коллектора не увлажнялись ?
3- В каком месте располагают пусковую обмотку ?
4. Как изолируют витки пусковой оюмотки ?
5. Почему применяют открытое перекрещенное соединение выводов обмоток полюсов?
6. Почему подшипниковый щит выполнен каркасной конструкцией с выемной ступицей ?
7. Для чего армируют щетки ?

Глава 6.

Двигатели постоянного тока

6.1. Общие сведения

Двигатели постоянного тока широко применяют в тяговом подвижном составе. Это коллекторные тяговые двигатели и коллекторные вспомогательные машины электровозов, тепловозов, электро- и дизель-поездов.

По способу возбуждения двигатели постоянного тока подразделяют аналогично генераторам на двигатели независимого, параллельного, последовательного и смешанного возбуждения. Схемы двигателей и генераторов по всем видам возбуждения одинаковы (рис. 6.1).

Электрические машины постоянного тока обладают свойством обратимости, т.е. они могут работать как в режиме генератора так и в режиме двигателя. Принцип действия двигателя описан в гл. 1. Рассмотрим отличие режимов работы генератора и

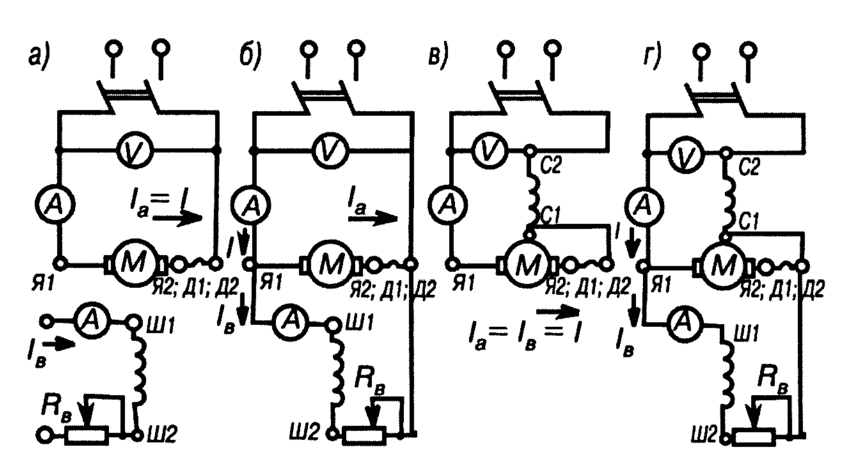


Рис. 6.1. Схемы двигателей постоянного тока с независимым (а), параллельным (б), последовательным (б) и смешанным (г) возбуждением

двигателя. На рис. 6.2 показана схемы генератора параллельного возбуждения (рис. 6.2, *а*) и двигателя параллельного возбуждения (рис. 6.2, *б*). Главное отличие заключается в преобразовании энергии — генератор преобразует механическую энергию в электрическую, а двигатель — наоборот. Генератор необходимо всегда приводить во вращение, т.е. подводить механическую энергию, а двигатели могут работать самостоятельно (исключение составляет двигатель последовательного возбуждения,который не может работать без нагрузки). Достаточно подвести электроэнергию к двигателю и якорь начнет вращаться.

Электромагнитный момент генератора является тормозным, т.е. направлен против вращения якоря, а в двигателе совпадает с направлением вращения , т.е. является вращающим.

В генераторе ток и ЭДС якоря совпадают по направлению, а в двигателе направлены в противоположные стороны. Поэтому ЭДС двигателя называют противо-ЭДС.

Уравнение напряжения для цепи якоря

$$U = E + I_а R_а \,. \qquad (6.1)$$

Из равенства (6.1) следует, что в режиме двигателя всегда $U > E$.

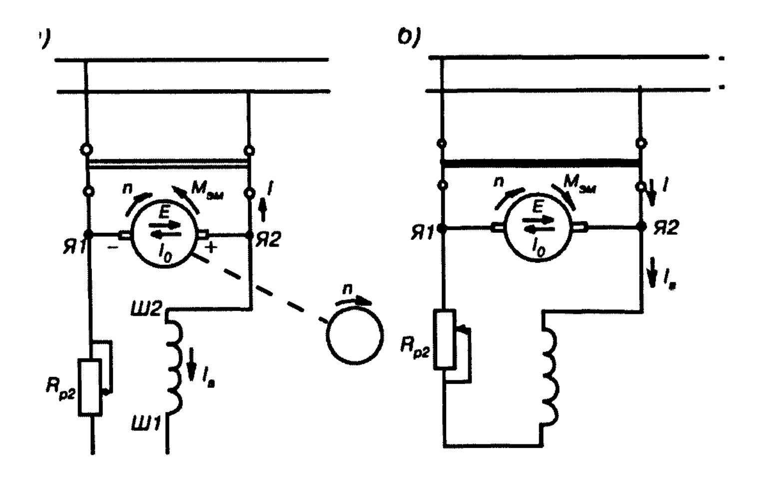


Рис. 6.2. Работа машины постоянного тока :
а — в генераторном режиме; в — в двигательном

Из формулы (6.1) определим значение тока

$$I = (U - E)/R_а. \qquad (6.2)$$

Электромагнитный момент двигателя

$$M_{эм} = P_{эм}\Big/\omega = 9{,}55\frac{P_{эм}}{n}. \qquad (6.3)$$

и расходуется на уравновешивание тормозящих моментов:

а) момента потерь $M_о$;

б) момента нагрузки на валу двигателя, создаваемого приводом — устройством, которое приводит во вращение двигатель — M_2 ;

в) динамического момента — $M_{дин}$ (см. равенство 5.)

$$M_2 = P_2/\omega ,$$

$$M_{эм} = M_0 + M_2 \pm M_{дин}, \qquad (6.4)$$

$$M_{эм} = M_{ст} \pm M_{дин},$$

где $M_{ст} = M_0 + M_2$ — статический момент сопротивления.

При установившемся режиме, когда ω — const и $M_{дин} = 0$, $M_{эм} = M_{ст}$.

Обычно M_0 мал по сравнению с M_2, поэтому приблизительно можно считать,что при установившемся режиме работы $M_{эм} = M_{ст}$.

В зависимости от знака динамического момента различают следующие режимы работы двигателя

$M_{дин} > 0$, т.е. $(d\omega/dt) > 0$, разбег при $\omega > 0$, торможение при $\omega < 0$;

$M_{дин} < 0$, т.е. $(d\omega/dt) < 0$, торможение при $\omega > 0$, разбег при $\omega < 0$;

$M_{дин} = 0$, т.е. $(d\omega/dt) = 0$, установившийся режим, т.е. ω = const.

При вращении двигателем какого-либо устройства к его валу прикладывается момент сопротивления $M_с$, который является тормозящим и действует навстречу электромагнитному моменту двигателя $M_э$ $M_{эм} = M_с$

При увеличении $M_с$, например, при движении поезда на подъем, увеличивается $M_с$, а это вызывает увеличение $M_{эм}$,

вследствии чего, согласно (6.6) увеличится ток двигателя. Следовательно, как и в любой электрической цепи, ток двигателя определяет нагрузки.

6.2. Пуск двигателя

Из формулы (6.2) видно, что ток двигателя зависит от напряжения U, противо-ЭДС E и сопротивления $R_а$. При подаче напряжения на обмотку статора, ротор из-за своей инерции не может мгновенно достичь номинальной частоты вращения, $\omega = 0$, следовательно противо-ЭДС будет равна нулю. Если напряжение в формуле (6.2) принять за 100%, то противо-ЭДС составит 92–95%. Тогда ток $I_а$ будет ограничиваться только внутренним сопротивлением $R_{а,}$ которое очень мало

$$I_а = U/R_а. \qquad (6.7)$$

Для тягового двигателя $R_а$ составляет примерно 0,01 Ом. Поэтому при прямом пуске с $U = U_н$ ток якоря недопустимо велик $I_а = (50...100)I_н$. Такая величина тока очень опасна для двигателя, так как может вызвать круговой огонь по коллектору и чрезмерно большой пусковой момент, который окажет ударное действие на вращающие части машины с последующим их разрушением. Кроме того, большой ток может вызвать падение напряжения в сети, что неблагоприятно скажется на работе других потребителей.

Из формулы (6.7) видно, что для ограничения пусковых токов необходимо или уменьшить величину питающего напряжения $U_д$, или увеличить сопротивление. На ТПС применяют оба способа. На тепловозах, электровозах и электропоездах переменного тока применяют первый способ. На тяговые электродвигатели подают напряжение $U_п$ такой величины, чтобы по обмоткам якоря протекал ток $I_п$,обеспечивающий трогание ТПС с места и не вызывал нарушения нормальной работы тяговых электродвигателей

$$U_п = I_п R_а .$$

На электродвижущем составе (ЭПС) постоянного тока применяют пусковой реостат $R_п$, сопротивление которого можно изменять в широких пределах.

При включении в цепь двигателя реостата (рис 6.3)

$$U_д = E + I_а(R_п + R_а), \qquad (6.8)$$

откуда

$$I_а = U_д/(R_п + R_а). \qquad (6.9)$$

Перед включением двигателя в сеть вводят максимальное пусковое сопротивление. По мере нарастания частоты вращения увеличивается противо-ЭДС $E_а = C_е\Phi\omega$, что вызывает уменьшение пускового тока и пускового момента. По мере разгона якоря уменьшают сопротивление пускового реостата. При отключении части сопротивления наблюдается бросок тока якоря, вызывающего бросок момента, что сопровождается появлением на ТПС больших механических усилий (на пассажирских ТПС — дискомфорт пассажиров).

Поэтому число ступеней пускового реостата увеличивают.

Из формулы (6.9) можно определить полное сопротивление пускового реостата R.

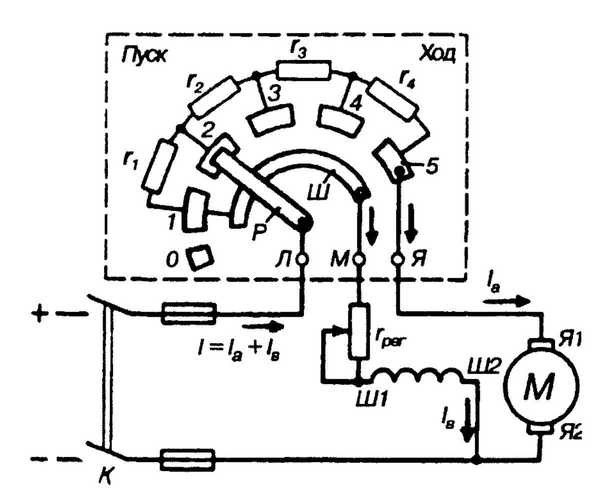


Рис. 6.3. Пуск в ход

$$R_п = (U/I_п) - R_а. \qquad (6.10)$$

Ступени пускового реостата определяют исходя из максимальных и минимальных величин пусковых токов.

6.3. Реверсирование

Реверсирование — изменение направления вращения якоря. Аппарат, с помощью которого осуществляется реверсирование, назывется реверсором.

На рис. 6.4, *а* показана схема двигателя с последовательным возбуждением, который присоединен к электри ческой линии постоянного тока. Направление выталкивающей силы показано на рис. 6.4, *б*. Изменим полярность питания двигателя, т.е. поменяем местами точки *а* и *б*. В этом случае изменится направление тока в якоре и в обмотках возбуждения (рис. 6.4, *в*). Направление выталкивающей силы определим по правилу левой руки. Как видим, реверсирование не произошло. Изменим полярность питания якоря, оставив без изменения полярность питания главных полюсов(рис. 6.4, *г*). Определив по правилу левой руки направление выталкивающей силы, видим, что ее направление изменилось на противоположное. Так же изменится направление выталкивающей силы при изменении

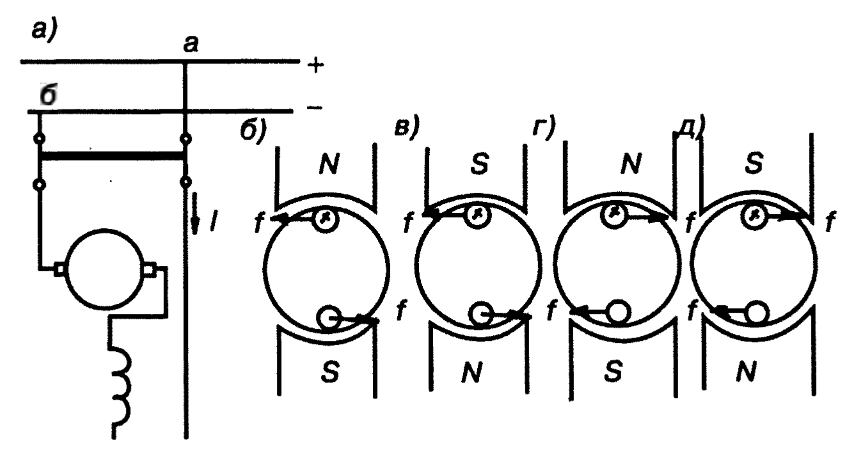


Рис. 6.4. Реверсирование

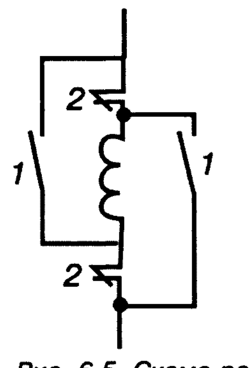


Рис. 6.5. Схема реверсора

полярности питания обмотки возбуждения главных полюсов, не изменяя полярности питания обмотки якоря (рис. 6.4, *д*).

Таким образом, для реверсирования двигателя постоянного тока необходимо изменить полярность питания якоря, оставив без изменения полярность питания обмотки возбуждения или наоборот, изменить полярность питания обмотки возбуждения, оставив без изменения полярность питания обмотки якоря. На рис. 6.5 показана схема реверсора тягового двигателя. На этой схеме одновременно замыкается или размыкается по две пары контактов: *1* или *2*, изменяя направление тока в обмотке возбуждения. Такие контакты вместо обмотки возбуждения могут быть поставлены в обмотку якоря.

6.4. Регулирование частоты вращения двигателя постоянного тока

Из формулы $E=C_e\Phi\, n$ определим частоту вращения якоря

$$n=\frac{E}{(C_e\Phi)}=\frac{(U-I_a(R_a+R_n))}{C_e\Phi}. \quad (6.11)$$

Из формулы (6.11) следует, что частота вращения двигателя постоянного тока зависит от величины подведенного напряжения, падения напряжения в цепи якоря, сопротивления пускового реостата, магнитного потока и конструктивных особенностей машины.

На электровозах и электропоездах переменного тока напряжение, подаваемое на тяговый электродвигатель, изменяют от минимального до номинального $U_н$. Аналогично изменяют напряжение, подаваемое на тяговый электродвигатель тепловозов. Так как работа двигателя при $U > U_н$ недопустима, то при напряжении сети превышающей допустимое напряжение тягового электродвигателя несколько тяговых электродвигателей соединяют

последовательно, затем последовательно — параллельно, и, наконец, параллельно (электровозы и электропоезда постоянного тока, рис. 6.6).

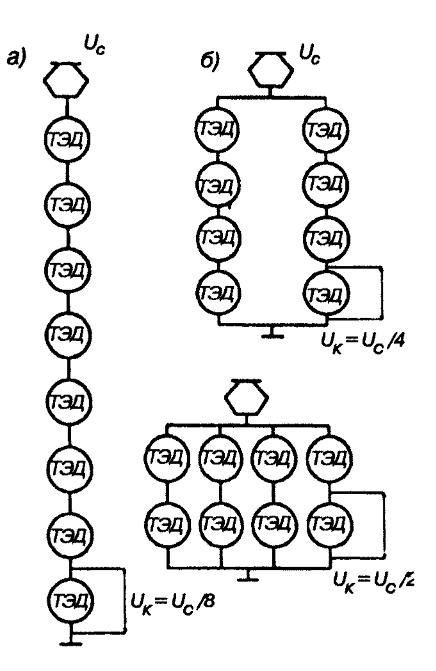


Рис. 6.6. Регулирование скорости ТЭД электровозов постоянного тока

Удобным и экономичным способом регулирования частоты вращения двигателя постоянного тока является изменение магнитного потока $Ф$, который зависит от тока возбуждения $I_в$.

Согласно выражению (6.11) с уменьшением $Ф$ частота вращения возрастает. При таком способе регулирования КПД двигателя остается высоким, так как мощность возбуждения мала. Верхний предел регулирования частоты вращения ограничивается механической прочностью машины и условиями коммутации. При высокой скорости увеличивается вибрация щеточного аппарата, нарушается щеточный контакт, увеличивается напряжение между смежными коллекторными пластинами (межламельное напряжение).

Кроме того, при ослаблении основного магнитного потока усиливается искажающее влияние реакции якоря. Все эти факторы значительно ухудшают коммутацию. Ослабление возбуждения применяют на всех тяговых двигателях как электровозов и электропоездов, так и тепловозов.

Третий способ регулирования частоты вращения заключается во включении последовательно с обмоткой якоря реостата или регулируемого сопротивления $R_В$. Тогда с учетом выражения (6.11) имеем

$$n = [U - I(R_а + R_в)]/C_еФ. \quad (6.12)$$

При увеличении $R_в$ частота вращения уменьшается. Способ связан со значительными потерями в сопротивлении $R_в$ и понижением КПД. Применяется на электровозах и электропоездах постоянного тока, а также на электровозах двойного питания.

6.5. Двигатели параллельного возбуждения

На (см. рис. 6.1, *б*) показана схема двигателя параллельного возбуждения. Иногда этот двигатель называют *двигателем с независимым возбуждением*, так как ток обмотки возбуждения не зависит от тока якоря. В цепь якоря включен пусковой реостат $R_п$, а в цепь обмотки возбуждения — регулировочный реостат $R_{рг}$, предназначенный для изменения тока возбуждения и магнитного потока главных полюсов.

Экспериментально снимают следующие виды характеристик: рабочие — представляющие собой зависимости n, M, от полезной мощности P_2; регулировочные — n, $I_а$ от магнитного потока Φ; электромеханические — n, M, от потребляемого тока; механическую — n от M.

Иногда электромеханические характеристики называют *рабочими*. Действительно, $P_2 = P_1\eta = \eta UI$, так как величина напряжения U, питающего двигатель является постоянной величиной, а ток является мерилом нагрузки, то можно считать, что рабочие характеристики в другом масштабе повторяют электромеханические.

В любом случае при снятии рабочих характеристик вал двигателя нагружают. В простейшем случае это может быть обычная доска, которой придавливают вал двигателя — создавая тормозной момент. Для тягового электродвигателя — это масса поезда, трение в подшипниках, сопротивление воздуха, профиль пути и другие факторы, создающие сопротивление движению.

При увеличении тормозного момента увеличивается ток двигателя, но магнитный поток главных полюсов несколько уменьшается из-за действия поперечной реакции якоря. Вследствие этого частота вращения n в соответствии с

выражением (6.12), будет возрастать. Но, падение напряжения $I_a R_a$ вызовет уменьшение частоты вращения. Ввиду того, что влияние реакции якоря меньше, чем падение напряжения $I_a R_a$, при $U = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$, характеристика $n = f(I_a)$ имеет наклон к оси абсцисс и по этой же причине характеристика прямолинейна (см. рис. 6.7). Изменение частоты вращения двигателя при переходе от номинальной нагрузки к холостому ходу, выраженное в процентах , называют *номинальным изменением частоты вращения*

$$n = [(n_0 - n_{ном})/n_{ном}]100\% . \qquad (6.13)$$

Зависимость момента от тока нагрузки $M = f(I_a)$ при $U = \text{const}$ и $I_в = \text{const}$ определяют выражением

$$M = C_м \Phi I_a = M_0 + M_2 = M_c. \qquad (6.14)$$

При отсутствии тормозного момента на валу двигателя, электромагнитный момент расходуется на преодоление трения потерь в подшипниках, сопротивлением якоря о воздух, трением щеток о коллектор. Поэтому $M = M_0 = Об$ (рис. 6.7).

Если бы реакция якоря отсутствовала, то характеристика $M = f(I_a)$ представляла бы прямую линию, выходящую из точки *б*. Но, в результате действия реакции якоря магнитный поток Φ несколько уменьшается и моментная характеристика растет несколько медленнее, чем ток I_a.

Рабочие характеристики двигателя параллельного возбуждения представлены на рис. 6.8. С увеличением мощности на валу P_2 растет и момент на валу M_2. Увеличение P_2 и M_2, сопровождается увеличением тока двигателя I. Пропорционально току I растет потребляемая из сети мощность P_1 При холостом ходе $P_2 = 0$; $\eta = P_2/P_1 = 0$; затем с

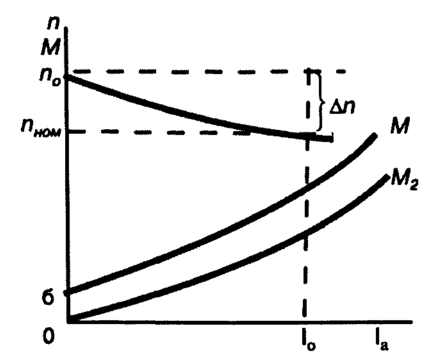


Рис. 6.7. Электромеханические характеристики двигателя с параллельным возбуждением

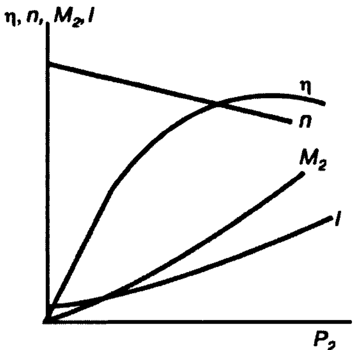


Рис. 6.8. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением

увеличением P_2 сначала КПД быстро растет, но при больших нагрузках растут электрические потери $P_{эл} = I^2R$, что ведет к уменьшению КПД.

Аналитическое выражение механической характеристики получают путем преобразования (6.12)

$$n = (U - I_a R)/C_e Ф = (U/C_e Ф) - [(I_a R)/(C_e Ф)]. \qquad (6.15)$$

В выражение (6.15) подставим значение тока якоря $I = M/(C_м Ф)$

$$n = (U/C_e Ф) - (M\ R)/(C_e C_м Ф) = n_0 - n. \qquad (6.16)$$

Механическая характеристика представлена на рис. 6.9.

Угол наклона механической характеристики тем больше, чем большее значение сопротивления, включенного в цепь якоря.

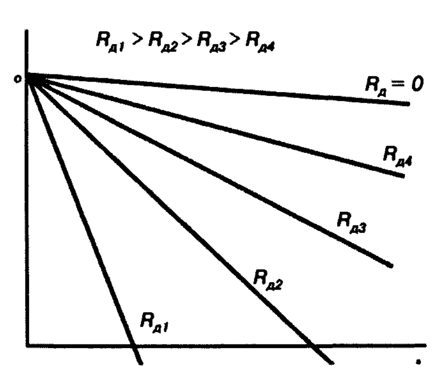


Рис. 6.9. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением

Рассмотрим как будут изменяться частота вращения якоря и электромагнитный момент при изменении дополнительного сопротивления, включенного в цепь якоря.

Дополнительное сопротивление вводят в цепь якоря так же как пусковой реостат. Но, в отличие от пускового реостата, дополнительное сопротивление должно быть рассчитано на продолжительный ток.

$$n = [U - I(R_а + R_д)]/C_еФ. \quad (6.17)$$

Знаменатель выражения (6.17) не меняется, а в числителе — изменяется величина $R_д$.

С увеличением $R_д$ увеличивается наклон характеристик, а частота вращения уменьшается. Способ обеспечивает плавное регулирование частоты вращения, но он неэкономичен из-за значительных потерь ($I_а^2 R_д$) в дополнительном сопротивлении.

Изменение напряжения. Для реализации этого способа регулирования необходимо иметь источник питания, напряжение на зажимах которого может изменяться в широких пределах. Напряжение на зажимах обмотки возбуждения не меняется, поэтому ее питают отдельно от якоря. Мощность источника питания должна быть равна или несколько большей номинальной потребляемой мощности двигателя.

Характеристики (рис. 6.10) представляют собой семейство параллельных друг другу прямых, каждая из которых отсекает на оси ординат отрезок $n_{ор} = U/кФ_н$.

Частоту вращения можно регулировать вниз от номинальной, так как напряжение свыше номинального недопустимо.

Изменение основного магнитного потока. Этот способ регулирования следует из формулы (6.12). Так как при номинальном режиме обычно машина находится в насыщенном состоянии, то увеличивать магнитный поток практически невозможно. Поэтому его только уменьшают. Следует отметить, что ослабление потока однозначно приводит к росту частоты вращения только в том случае, когда момент нагрузки на валу двигателя обратно пропорционален скорости. Если же $M_с$ = const, то увеличение частоты вращения будет иметь место лишь до определенного значения $C_еФ$. При дальнейшем снижении потока начнется снижение n, так как в случае M = const ослаб-

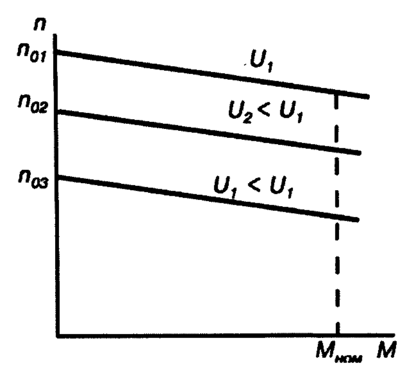


Рис. 6.10. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при изменении напряжения в цепи якоря

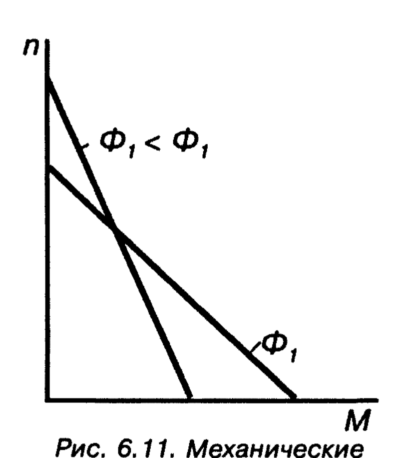


Рис. 6.11. Механические характеристики двигателя с параллельным возбуждением при изменении магнитного потока

ление потока приводит к увеличению тока якоря $I_{а} = M/C_{м}Ф$, а значит, и к увеличению падения напряжения на сопротивлениях цепи якоря (рис. 6.11). Начиная с некоторого значения магнитного потока в процессе его снижения увеличение частоты вращения идет медленнее, чем уменьшается частота вращения, обусловленная падением напряжения на $R_{а}$.

6.6. Двигатель последовательного возбуждения

Схема двигателя последовательного возбуждения показана на рис. 6.12. Обмотка возбуждения двигателя включена последовательно с его якорем, в связи с чем ток возбуждения, а следовательно, и магнитный поток главных полюсов определяется нагрузкой на валу двигателя

$$I_{в} = I_{а} = I. \qquad (6.18)$$

Следовательно

$$Ф = k_{ф}I. \qquad (6.19)$$

Коэффициент пропорциональности $k_{ф}$ в значительном интервале нагрузок, при $I < I_{Н}$, являющегося практически постоянным, и лишь $I > (0{,}8–0{,}9)I_{Н}$ вследствие насыщения магнитной цепи $k_{ф}$ начинает несколько уменьшаться. В формулу частоты вращения $n = (U - IR_{а})/C_{е}Ф$ и момента $M = C_{м}ФI_{а}$ подставим (6.19) и получим выражения

$$n = (U - I_а R_а)/(C_е k_ф I) = U/(C_е k_ф I) - R/(C_е k_ф) \qquad (6.20)$$

$$M = C_м k_ф I^2. \qquad (6.21)$$

При насыщении справедливы выражения (6.12) и (6.14).

Рабочие характеристики показаны на рис 6.13.Скоростная характеристика двигателя последовательного возбуждения вначале имеет гиперболический характер. По мере увеличения тока двигатель насыщается все сильнее, и его частота вращения начинает изменяться по линейному закону, так как нарушается обратно пропорциональная зависимость между частотой вращения n и током I нарушается. Штриховой линией показана кривая n, если бы не было насыщения.

Кривая электромагнитного момента M при малых токах имеет форму параболы, при насыщении квадратичная зависимость между M и I нарушается и носит линейный характер.

Поскольку у двигателей параллельного возбуждения $M = I$, а у двигателей последовательного возбуждения приблизительно $M = I^2$ и при пуске допускается $I = (1{,}5–2{,}0)I_Н$, то двигатели последовательного возбуждения развивают значительно больший пусковой момент по сравнению с двигателями параллельного возбуждения.

Рассмотрим механическую характеристику двигателя с последовательным возбуждением, которую можно построить из рабочей характеристики. Для этого необходимо провести ряд вертикальных прямых и отложить точки пересечения с n и M. Затем отмеченные точки наносят в осях координат $n = f(M)$. Получаем кривую, близкую к гиперболе (рис. 6.13).

$$P_2 = M_1 n_1/9{,}55 = (M_2 n_2)/9{,}55. \qquad (6.22)$$

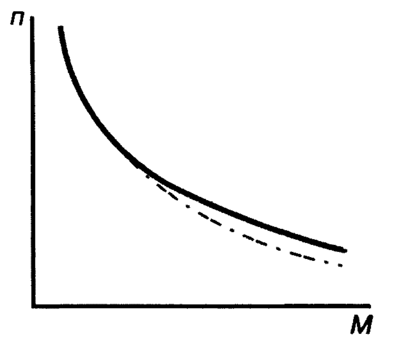


Рис. 6.13. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением

О свойствах гиперболы говорилось в предыдущей главе. Таким образом, у двигателей

последовательного возбуждения при изменении момента нагрузки в широких пределах мощность изменяется в меньших пределах, чем у двигателей параллельного возбуждения.

Это определило их использование в качестве тяговых на локомотивах и в электропоездах.

Однако следует обратить внимание на то, что при значительном уменьшении нагрузки двигатель начинает развивать все большую скорость или, как говорят, начинает идти в «разнос». При холостом ходе $\Phi = 0$, скорость двигателя преобретает опасные значения по своим механическим последствиям — выпадение клиньев, крепящих обмотку якоря, разрыв бандажей и т.д.

Поэтому двигатель последоватального возбуждения нельзя включить в сеть при нагрузке менее 25–30 % от номинальной, также нельзя применять в качестве привода с фрикционной и ременной передачей, из-за их возможного проскальзования.

Регулирование скорости изменения напряжения. Как и у двигателя с параллельным возбуждением этим способом можно только уменьшить напряжение от номинального до нуля. Получаем семейство кривых (рис. 6.14). Рассматриваемый способ применяется в тяговом подвижном составе, например, на тепловозах с электрической передачей постоянного тока, где напряжение меняется генератором постоянного тока в зависииости от позиций контроллера машиниста. На электровозах и электропоездах переменного тока напряжение меняется тяговым трансформатором (электровозы ВЛ80^т, ВЛ80^с,ВЛ85, электропоезд ЭД9^е и др.)

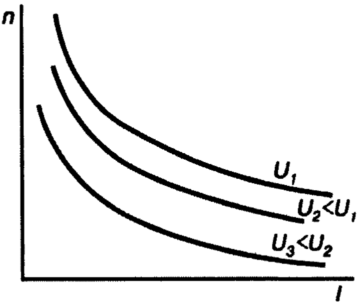


Рис. 6.14. Регулирование частоты вращения изменением напряжения

Менять можно напряжение изменением схемы соединения ТЭД, как это применяется на электровозах постоянного тока ВЛ10, ВЛ11. На этих электровозах — три схемы соединения ТЭД:

последовательное (С) с восемью ТЭД (см. рис. 6.6, *а*) с напряжением на каждом ТЭД $U_д = 3000/8 = 375$ В;

последовательно-параллельное (СП) по четыре ТЭД (см.

рис 6.6, *б*) с напряжением на каждом ТЭД $U_д$ = 3000/4 = 750 В;

параллельное (П) соединение четырех групп ТЭД по два двигателя последовательно (см. рис. 6.6, *в*) с напряжением на каждом ТЭД $U_д$ = 3000/2 = 1500 В.

Регулирование скорости включением сопротивления в цепь якоря. Этот способ позволяет регулировать n от нуля до номинального значения. Однако в реостате теряется много энергии, потребляемой из контактной сети, что вызывает снижение КПД электроподвижного состава и нагрев самого реостата. Поэтому его включают кратковременно только на период пуска и разгона электроподвижного состава и называют *пусковым реостатом.*

Регулирование частоты вращения ослаблением возбуждения. Регулирование частоты вращения n посредством ослабления возбуждения производится либо путем шунтирования обмотки возбуждения некоторым сопротивлением $R_ш$ (рис. 6.15, *а*), либо изменением числа витков (рис. 6.15, *б*). Степень шунтирования

$$\beta = I_в/I_а. \quad (6.23)$$

Через обмотку возбуждения проходит только часть тока якоря $i_а$, а остальная его часть проходит через резистор $R_ш$. При меньшем токе возбуждения (по сравнению с током якоря) в магнитной системе наводится меньший магнитный поток и как следует из формулы (6.12), частота вращения при том же токе получается больше, чем в режиме полного возбуждения, при котором весь ток якоря проходит по обмоткам возбуждения. Обычно через контакты включают несколько резисторов, в результате чего получают несколько ступеней возбуждения.

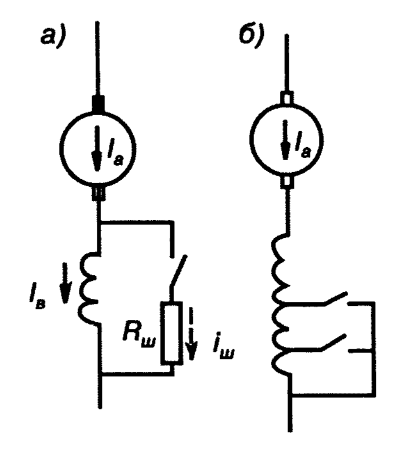


Рис. 6.15. Регулирование частоты вращения:

а — шунтированием обмотки возбуждения; б — изменением числа витков

Второй способ изменения возбуждения основан на отключении части витков катушек. Каждая катушка должна быть секционирована и из нее нужно делать дополнительные выводы. Этот способ ослабления возбуждения не нашел применения на ЭПС и тепловозах из-за усложнения конструкции электродвигателей, так как для каждой ступени ослабления возбуждения необходимо добавлять по одному выводу из каждой ступени ослабления возбуждения, размещение которых в ограниченных габаритах двигателя практически невозможно.

Импульсное регулирование частоты вращения. Включение реостата при пуске приводит к потериям электрической энергии, особенно это заметно на электропоездах в пригородном движении при большом числе остановок, где они составляют 12–15% общих затрат на тягу поездов.

Поэтому на новых электропоездах и электровозах применяют систему безреостатного пуска — импульсное регулирование подведенного к тяговым электродвигателям напряжения, среднее значение которого можно плавно изменять. Схема изображена на рис. 6.16, *а*)

Тиристор *VS* подобен ключу (рубильнику), который переодически замыкает и размыкает цепи питания двигателя *Д*. При замыкании ключа в цепь двигателя на время Δt подводят напряжение. Это вызовет появление тока $U = U_{имп}$, затем цепь размыкают ключом и ток в ней убывает, но не уменьшается до нуля, из-за наличия индуктивного сопротивления обмоток, а до некоторого значения $I_{a\,min}$. При повторном замыкании цепи тиристором *VS* ток достигает значения $I_{a\,max}$ и т.д. Таким образом, к двигателю подводят некоторое напряжениие $U_{ср}$.

$$U_{ср} = U(t_1/T) = aU, \tag{6.24}$$

где T — период — отрезок времени между двумя следующими друг за другом импульсоми напряжений (см. рис. 6.1, *б*);

a — коэффициент управления.

Следовательно, к обмотке двигателя подводят ток, среднее значение которого

$$I_{aср} = (I_{a\max} + I_{a\min})/2. \tag{6.25}$$

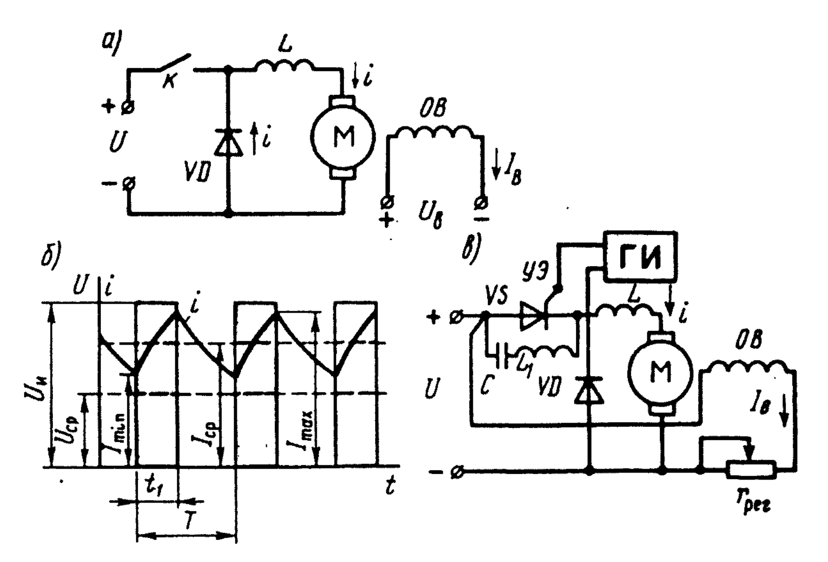


Рис. 6.16. Импульсное регулирование частоты вращения

Частота вращения двигателя составит

$$n = (aU - I_{аср}R_а)/C_еФ. \qquad (6.26)$$

Как видно из формулы (6.26), импульсное регулирование частоты вращения аналогично регулированию изменением подводимого к двигателю напряжения. Для уменьшения пульсаций тока в цепь двигателя включена катушка индуктивности (дроссель) *L*. Тиристор *VS* открывается импульсами, подаваемыми от генератора импульсов (ГИ) на управляющий электрод (УЭ) тиристора *VS*. Цепь *LC*, шунтирующая тиристор *VS*, служит для запирания последнего в период между управляющими импульсами.

Следовательно, изменяя время t_2 выключения цепи, тиристором *VS* можно регулировать среднее напряжение на двигателе. Этот метод регулирования напряжения называют *широтно-импульсным*. Существует также *частотноимпульсный* метод регулирования напряжения, при котором время $t_1 - t_2$ остается неизменным, а изменяется период *T* (или частота).

В связи с тем, что момент времени закрытия t_2 тиристора можно изменять плавно, среднее напряжение на тяговом элект-

родвигателе, а следовательно, и скорость движения ТПС регулируется также плавно.

Систему импульсного регулирования используют также для плавного изменения сопротивления пускового реостата между ступенями и бесступенчатого регулирования ослабления возбуждения. В первом случае тиристор включают параллельно ступеням реостата, во втором случае — параллельно обмоткам возбуждения тягового электродвигателя.

6.7. Двигатель смешанного возбуждения

Двигатель смешанного возбуждения (см. рис. 6.1, *г*), как и генератор смешанного возбуждения, имеет на каждом полюсе по две обмотки возбуждения: параллельную и последовательную

$$n = (U - I_a R_a)/[C_e(\Phi_1 \pm \Phi_2)], \qquad (6.27)$$

где Φ_1 и Φ_2 — магнитные потоки параллельной и последовательной обмоток возбуждения. Знак плюс соответствует согласному включению обмоток возбуждения, а знак минус — встречному.

При согласном включении обмоток возбуждения результирующий магнитный поток с увеличением нагрузки возрастает, что приводит к уменьшению частоты вращения двигателя. Поэтому такой двигатель имеет более мягкую скоростную характеристику по сравнению с двигателем параллельного возбуждения, но более жесткую по сравнению с двигателем последовательного возбуждения (кривая *1*, рис. 6.17).

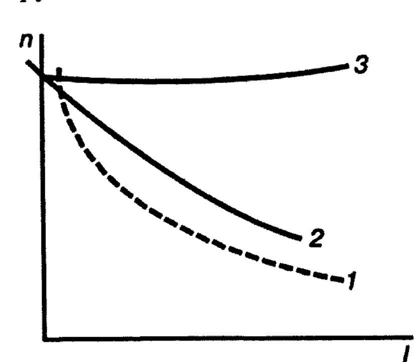


Рис. 6.17. Характеристики двигателя смешанного возбуждения

При встречном включении обмоток возбуждения магнитный поток Φ_2 при увеличении нагрузки размагничивает маши-

ну, что, наоборот, увеличивает частоту вращения. Работа двигателя становится неустойчивой, так как с увеличением нагрузки частота вращения неограниченно возрастает (кривая *2*, рис. 6.17). Но, при небольшом числе витков последовательной обмотки возбуждения с увеличением нагрузки частота вращения не возрастает и во всем интервале нагрузок остается почти неизменной (кривая *3*, рис. 6.17).

Двигатель смешанного возбуждения применяют в условиях, когда требуется большой пусковой момент, быстрое ускорение при пуске и допустимы значительные изменения скорости вращения при изменении нагрузки Этот двигатель может работать вхолостую, так как магнитный поток параллельной обмотки Φ_1 ограничивает частоту вращения двигателя в режиме холостого хода и устраняет опасность «разноса». Но, двигатель смешанного возбуждения, имеющий на каждом полюсе по две обмотки возбуждения, более дорогостоящий по сравнению с двигателем рассмотренных выше типов, что несколько ограничивает его применение.

Контрольные вопросы

1. Назовите отличительные признаки режимов работы машин постоянного тока : двигателя и генератора?
2. Назовите способы ограничения пусковых токов, применяемые при пуске в ход двигателя постоянного тока?
3. Назовите способы регулирования частоты?
4. Как производится реверсирование двигателя постоянного тока?
5. Сравните свойства двигателей параллельного, последовательного и смешанного возбуждений.

Глава 7.

Тяговые электродвигатели

7.1. Общие сведения

Тяговые электродвигатели (ТЭД) предназначены для преобразования электрической энергии в механическую. Момент, созданный ТЭД, через зубчатую передачу и колесную пару преобразуется в силу тяги локомотива, которая реализуется в точке контакта колеса с рельсом. ТЭД расположены на тележках. Существуют два способа подвешивания ТЭД: опорно-осевое («трамвайное») которое применяется при невысоких скоростях движения (грузовые локомотивы), и опорно-рамное используемое на пассажирских локомотивах и электропоездах. При опорно-осевом подвешивании тяговый двигатель одной стороной прикреплен к раме тележки. а другой, противоположной, через подшипник опирается на ось колесной пары. В этом случае, примерно половина массы двигателя является подрессоренной, а другая половина, опирающеяся на ось колесной пары, является неподрессоренной.

Удары от неровностей пути, воспринимаемые колесной парой, жестко передаются на ТЭД через моторно-осевые подшипники и зубчатое зацепление. В настоящее время в большинстве эксплуатируемых грузовых локомотивов применяют опорно-осевое подвешивание.

При опорно-рамном подвешивании ТЭД прикреплен к раме тележки и его масса полностью подрессорена относительно колесной пары.

Этот вид подвешивания применяют на пассажирских локомотивах и электропоездах, так как при скоростях движения 120 км/ч и выше опорно-осевое подвешивание из-за высоких динамических нагрузок не применяют. Опорно-рамное подвешивание более дорогое и его целесообразно применять при высоких скоростях движения. Новые локомотивы, подготовленные к серийному производству, такие как электровозы Э1, Э2, Э3 и другие имеют опорно-рамное подвешивание.

7.2. *Условия работы*

Локомотивы и моторовагонный подвижной состав работают в различных климатических зонах, а, следовательно, и по разным стандартам: ГОСТ 15150 и ГОСТ 15543. Основная часть России расположена в зоне умеренного климата (У). Основная часть БАМа находится в зоне умеренно-холодного климата (УХЛ). ТЭД в исполнении У рассчитаны на работу при температуре окружающего воздуха от +40 до –50° С, а при исполнении УХЛ от +40 до –60° С. ГОСТ 15150 устанавливает, что ТЭД в исполнении У и УХЛ можно эксплуатировать в теплых, влажных, жарких сухих и очень жарких сухих климатических районах с температурой воздуха выше 40°С.

При высоких температурах происходит интенсивное старение изоляционных материалов, а также нарушается монолитность таких узлов ТЭД как коллекторы, моноблочные полюсные системы и др. Низкие температуры, кроме того, увеличивают жесткость пути и как следствие, происходит увеличение динамического воздействия на ТЭД, особенно при опорно-осевом подвешивании.

Высокая влажность воздуха уменьшает сопротивление изоляции, что может привести к ее пробою и выходу из строя ТЭД. Резкие перепады температуры с высокой влажностью воздуха может привести к обледенению. Коллектор покрывается инеем, что вызывает сильное искрение. Кроме того, высокая влажность воздуха вызывает ускоренную коррозию деталей ТЭД, выполненных из металлов.

Пыль, содержащаяся в воздухе, осаждаясь на изолированных поверхностях ТЭД снижает сопротивление электрической изоляции, а также теплопроводность, что может привести к перегреву обмоток. Пыль оказывает абразивное воздействие на подвижные детали ТЭД и тем самым вызывает их повышенный износ, а также на изоляционные и антикоррозийные поверхности и ускоряя их старение.

В летнее время в условиях Сибири, Севера и Дальнего Востока воздух насыщен насекомыми. Осаждение их остатков на охлаждаемых поверхностях и в вентиляционных каналах сни

жает интенсивность охлаждения в большей степени, чем пыль. Органическая смесь является токопроводящей, что представляет большую опасность для деталей, находящихся под напряжением.

На ТЭД воздействуют вибрации, которые с повышением скорости движения возрастают. По опытным данным ВЭлНИИ ускорения вибраций составляют для опорно-осевого подвешивания 20–25 g, для опорно-рамного подвешивания 3–5 g. Из технической механики известно, что произведение массы m ТЭД на ускорение a — есть сила F:

$$F = ma = m(20 \div 25)g \; ; \qquad (7.1)$$

при опорно-осевом подвешивании и

$$F = m(3 \div 5)g. \qquad (7.2)$$

при опорно-рамном подвешивании.

Сравнивая формулы (7.1) и (7.2) видим, что наибольшие динамические воздействия испытывает ТЭД при опорно-осевом подвешивании.

В соответствии с ГОСТ 6962 напряжение в контактной сети может колебаться в широких пределах.Для ЭПС постоянного тока номинальное напряжение в контактной сети составляет 3000 В; оно может увеличиваться до 3850 В и снижаться до 2200 В. В то же время при рекуперации напряжение может подниматься до 4000 В. В контактной сети переменного тока номинальное напряжение составляет 25000 В. Оно может увеличиватся до 29000 В и уменьшаться до 19000 В. При таких перепадах питающего напряжения ТЭД должен надежно работать. Необходимо также, чтобы ТЭД устойчиво работал при ослабленном возбуждении и нестационарных режимах при кратковременном отрывании токоприемника от контактного провода, например, во время гололеда.

ТЭД расположен в ограниченном пространстве. Боковые стороны ограничены колесными центрами, снизу — рельсовый путь, сверху — рама тележки, с торцов — ширина железнодорожной колеи за вычетом ширины бандажа колесной пары (остается 1440мм) и односторонних или двухсторонних редукторов. В эти ограниченные габариты требуется вписать большую мощность. Кроме того мощность ТЭД ограничена

потенциальными условиями на коллекторе, а также диаметром и линейной нагрузкой якоря. Максимальный диаметр якоря ограничен максимальной частотой вращения и габаритными размерами.

7.3. Режимы работы

Расчетными режимами работы ТЭД *являются часовой и продолжительный.*

Продолжительной называют мощность, с которой двигатель может работать в течение длительного времени, и при этом температура нагрева его отдельных частей не превысит допустимую.

Часовой называют мощность, с которой двигатель может работать в течение одного часа, и его обмотки за это время нагреваются под действием тока от температуры окружающей среды до предельно допустимой температуры.

Часовая мощность всегда несколько больше длительной. Соотношение продолжительной и часовой мощностей определяет эффективность вентиляции. Соответственно этому увеличивают ток продолжительного режима и ток часового режима. Ток, протекая по обмоткам, вызывает их нагрев. Нагревание обмоток якоря и катушек полюсов определяет работоспособность двигателя. Предельно допустимые превышения температур обмоток и коллектора при продолжительном режиме следующие:

Класс изоляции	B	F	H
Обмотка якоря, °С	120	140	160
Обмотка полюсов,°С	130	155	180
Коллектор, °С	95	95	105

При больших перегревах происходит разрушение изоляции.

7.4. Характеристики

Как указывалось выше, большинство ТЭД тягового подвижного состава имеют последовательное возбуждение. Двигатели параллельного возбуждения имеют более жест-

кие характеристики, поэтому их применяют в тех случаях, когда требуется постоянство частоты вращения.

Двигатели последовательного и смешанного возбуждений имеют более мягкие характеристики. Потребляемая ими мощность из сети при колебаниях момента меньше, чем у двигателей параллельного возбуждения. Характеристика, близкая к гиперболе, обеспечивает постоянство мощности.

На рис. 7.1 показана характеристика ТЭД ТЛ-2К1 электровозов ВГМ 1 и ВЛ10.

Отличие между тепловозными и электровозными ТЭД состоит в том, что мощность источника питания электровоза и

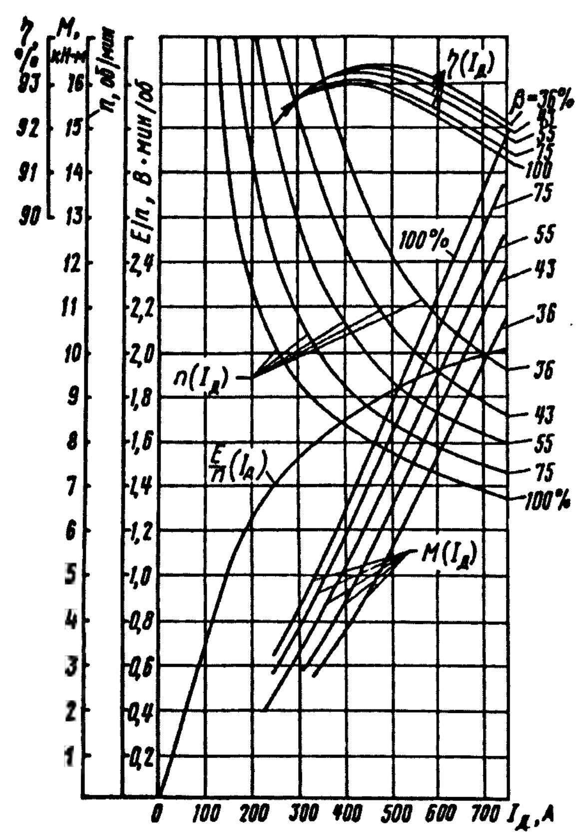


Рис. 7.1. Электромеханические характеристики тягового электродвигателя ТЛ-2К при $U_д$ = 1500 В

электропоезда практически не ограничена, а на тепловозах с ростом скорости v и тока I напряжение уменьшается. Ограничение I_{min} связано с увеличением насыщения магнитной цепи генератора, а I_{max} — с ограниченной мощностью источника питания.

Поэтому на электровозах обеспечивается большая сила тяги и мощность при высоких скоростях движения.

7.5. Устройство

Тяговые двигатели локомотивов имеют много общего, так как принцип их работы одинаковый. На устройство ТЭД оказывают влияние способ их подвешивания, тип передачи вращающего момента от вала ТЭД к оси колесной пары, число полюсов, а также наличие или отсутствие компенсационной обмотки. Принцип действия двигателя постоянного тока рассмотрен в гл. 1, а способы регулирования частоты вращения и характеристики двигателей с различными способами возбуждения — в гл. 6.

7.5.1. Остов

Остов ТЭД является частью магнитной цепи машины, в то же время он является корпусом. Остов — отливают из стали, например, 25Л-11. Остовы ТЭД НБ-507 выполнены сварными.

Как корпус, он воспринимает механические нагрузки от крутящего момента, от неровностей пути, от распорных усилий в зубчатой передаче. Как магнитопровод, он должен хорошо проводить магнитный поток.

После литья в остове не должно быть раковин, трещин, окалины и других дефектов. Форма остова определяется количеством полюсов и видом привода. При групповом приводе число полюсов может достигать восьми и более. Если ТЭД имеет четыре главных полюса,то остов обычно имеет восьмигранную форму, близкую к квадрату (рис. 7.2, *а*). Такую форму остова имеют ТЭД тепловозов, как грузовых, так и пассажирских, а также электропоездов. Если число полюсов шесть и более, то

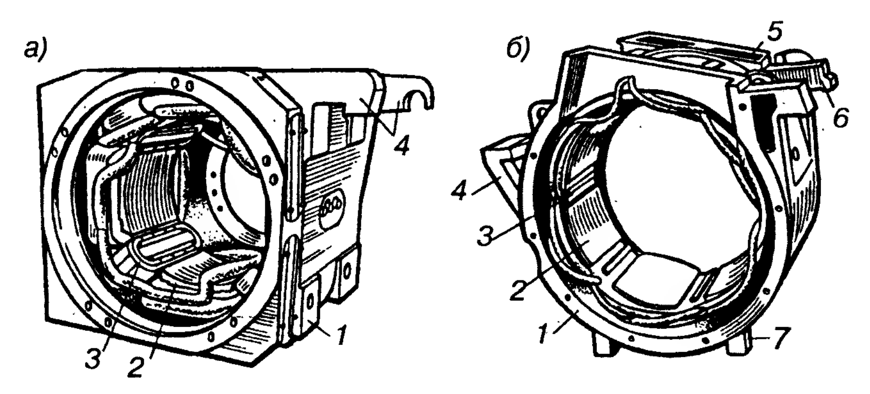


Рис. 7.2. Остовы тяговых двигателей УРТ-110А (а) и 2AL-4846еТ (б) с полюсами для рамного подвешивания:

1 — остов; 2 — главный полюс: 3 — добавочный полюс; 4 и 6 — кронштейны для подвешивания на раме тележки; 5 — прилив для крепления вентиляционной коробки; 7 — выступ для установки двигателя на полу

остов имеет цилиндрическую форму (рис. 7.2, *б*). Шесть полюсов имеют ряд преимуществ по сравнению с четырьмя.

Во-первых полюсное деление и магнитный поток полюса в 1,5 раза меньше, чем в четырехполюсном двигателе, благодаря чему во столько же раз уменьшается толщина остова, а следовательно, и его масса.

Во-вторых, с уменьшением полюсного деления уменьшаются ширина шины обмотки якоря, вылеты проводников и ток, проходящий по щеткодержателям. Это позволяет уменьшить рабочую длину коллектора и на эту величину увеличить длину сердечника якоря. Обычно эта величина составляет 10–20 мм. Благодаря увеличению длины якоря можно увеличить мощность ТЭД при тех же габаритных размерах.

В-третьих при уменьшении в 1,5 раза полюсного деления во столько же раз уменьшается МДС якоря по поперечной оси, а следовательно, и воздушный зазор под главными и добавочными полюсами. Это позволяет снизить массу катушек примерно на 10%. Также меньше толщина корпусной изоляции, что позволяет лучше отводить тепло, а следовательно, можно увеличить ток. А увеличение величины тока — это увеличение мощности ТЭД.

Четырехполюсные двигатели бывают с вертикально-горизонтальным и с диагональным расположением главных полюсов. Тот и другой вид расположения главных полюсов имеют свои достоинства и недостатки. При вертикально–горизонтальным расположении полюсов обеспечивается наиболее полное использование пространства. (до 91–94%), но масса остова больше. Во втором случае меньше масса, но хуже используется пространство (до 83–87 %). Цилиндрическая форма остова еще хуже использует габаритное пространство (до 79%), но имеет минимальную массу. При восьмигранной форме остова и горизонтально-вертикальном расположении главных полюсов уменьшается высота последних и увеличивается высота добавочных. Многогранная форма остова не обеспечивает выигрыша при $2p > 6$, поэтому машины с таким количеством полюсов изготовляют цилиндрической формы.

На поверхности остова находятся приливы (рис. 7.3) для крепления моторно-осевых подшипников при опорно-осевом подвешивании. Со стороны, противоположной моторно-осевым подшипникам, находятся опорные кронштейны (носики), между которыми помещена траверса подвески к раме тележки. Над основными «носиками» сделаны предохранительные приливы,

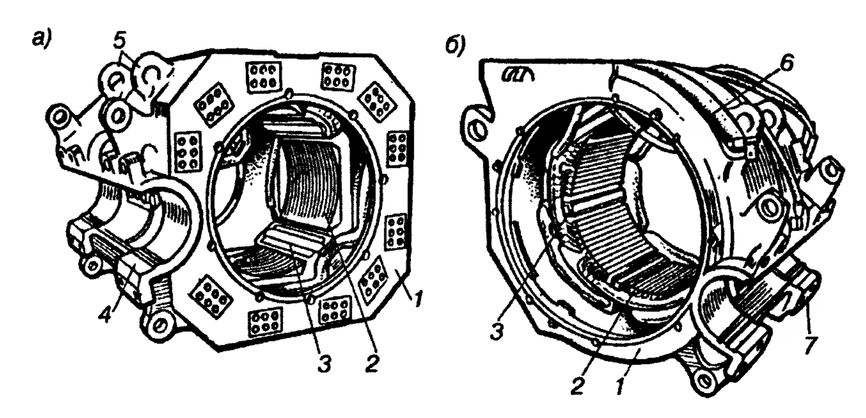


Рис. 7.3. Остовы тяговых двигателей НБ-406А (а) и НБ-412К (б) с опорно-осевым подвешиванием:

1 — остов; 2 — главный полюс; 3 — добавочный полюс; 4 и 7 — приливы опорно-осевого подшипника; 5 — проушины; 6 — люк коллектора

предотвращающие падение тягового двигателя на путь в случае поломки пружинной подвески двигателя.

При опорно-рамном подвешивании (см. рис. 7.2) с двух сторон находятся кронштейны *4* и *6* для подвешивания на раме тележки. На корпусе имеются также приливы с резьбой для крепления кожухов зубчатой передачи.

В торцевых сторонах остова имеются имеются отверстия — раструбы — для подвода и выхода охлаждающего воздуха, который чаще всего подается со стороны коллектора, а иногда с противоположной стороны.

Для осмотра щеток и коллектора в остове со стороны коллектора предусматривают два иногда три коллекторных люка, закрываемых крышками. Крышки изготавливают из стали Ст 2 или отливают из легких сплавов. Для увеличения объема надколлекторного пространства, крышки люков выгибают по дуге. Крышка верхнего коллекторного люка имеет уплотняющие войлочные прокладки, благодаря которым предотвращается попадание внутрь двигателя влаги, пыли и снега. Крышка укреплена на остове специальными болтами с цилиндрическими пружинами.

У тяговых двигателей ТЛ-2К1, НБ-418К остовы усилены снаружи двумя концентрически расположенными ребрами.

Для подъема и перемещения остова или всего ТЭД в верхней части остова предусмотрены проушины.

Внутренний диаметр остова определяют диаметром якоря, числом полюсов и классом изоляции.

Длина двигателя по наружным поверхностям подшипниковых щитов и при ширинпе коллеи 1520 мм и односторонней зубчатой передаче равна 1135–1185 мм и при двухсторонней 1020–1085 мм.

В торцевых стенках остова сделаны горловины с обработанными посадочными поверхностями для установки и крепления подшипниковых щитов.Горловину, противоположную коллектору, выполняют таких размеров, чтобы через нее можно было вынуть из остова якорь.

В остове выполнены отверстия для крепления главных и добавочных полюсов и вывода кабелей. Для предохранения кабелей от повреждения и попадания внутрь влаги, в отверстие вставляют резиновые втулки, плотно охватывающие кабели. Кабели укрепляют в выводных коробках, которые прикреплены

к остову. У отверстий выводных концов на остове отлиты буквы соответствующих выводов.

В настоящее время вместо литого стального остова начинается внедрение шихтованного. Такая конструкция имеет ряд достоинств:

магнитопровод имеет более высокую однородность т.к. отсутствуют литейные дефекты, такие как поры, раковины, воздушные пустоты, внутренние трещины ;

полюса располагаются не по окружности, а в радиальном направлении с высокой точностью;

уменьшаются потери в стали от действия вихревых токов ;

большие возможности при выборе формы охлаждающих каналов, формы катушек.

К недостаткам шихтованного остова следует отнести трудности с обеспечением механической жесткости конструкции. На рис. 7.4 показана одна из бескорпусных конструкций как одно целое. Остов *3* собирается из отдельныз листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм и скрепляется накладками *1* и *2*, которые уложены в пазы. Накладки приварены к полукорпусам *4* и *5*. Такая конструкция обеспечивает достаточную жесткость и прочность, а также снижает расход материалов на 3–5% по сравнению с литой конструкцией.

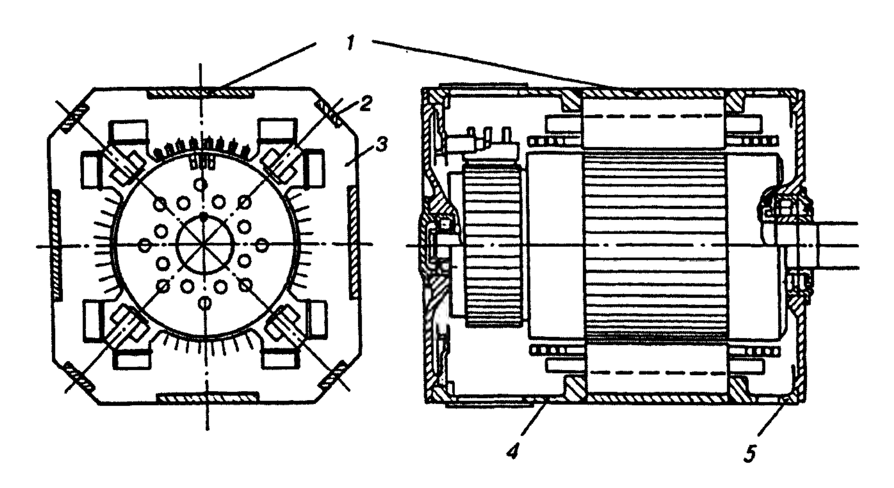


Рис. 7.4. Бескорпусная конструкция коллекторного ТЭД

7.5.2. Главные полюсы

Главные полюсы ТЭД изготавливают из отдельных стальных пластин толщиной 1,5–2 мм. Собранные листы сердечника спрессовают усилием около 100 кН и закрепляют четырьмя — шестью заклепками. Для крепления сердечника к остову в середине листа выштампованы отверстия, в которые запрессовывают один или два стальных стержня (рис. 7.5). В стержне сделаны резьбовые отверстия, посредством которых образуется болтовое крепление сердечника с остовом. Крепящие болты должны быть ввернуты в стержень на глубину не меньшую чем 1,25 их диаметра.

Катушки главных полюсов наматывают из шинной меди плашмя. При цилиндрическом остове наиболее часто катушки наматывают на ребро.

Витковую изоляцию катушек обычно выполняют асбестовой бумагой, а между слоями у двухслойных катушек устанавливают изоляционные прокладки из миканита. Корпусная изоляция класса В, обычно выполняется из асбестовой или киперной ленты, а класса Н — из стеклослюдинитовой. Толщина корпусной изоляции определяется напряжением на коллекторе и электрической прочностью примененного изоляционного материала. Но, чем больше толщина изоляции. тем хуже ее теплоотдача. Обмотки будут нагреваться до более высокой температуры плохо отдавая излишек тепла стальному сердечнику, который лучше охлаждается потоком воздуха.

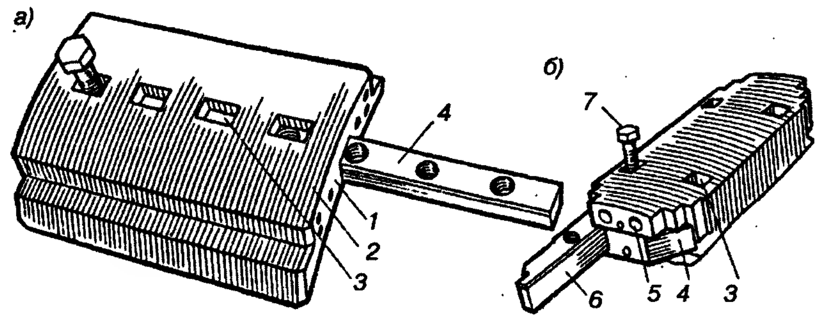


Рис. 7.5. Общий вид сердечника главных полюсов тяговых двигателей НБ406(а) и НБ412К (б)

Если выполняют изоляцию по типу «Монолит *2»,* класса F, то для корпусной изоляции применяют стеклослюдинитовую ленту ЛСКН толщиной 0,13 мм, а для покровной — стеклоленту также толщиной 0,13мм, наматывая одним слоем вполуперекрышу. В качестве витковой — асбест толщиной 0,6 мм. После сборки катушек их пропитывают в компаунде «Монолит 2».

Монолитная изоляция имеет ряд преимуществ по сравнению со стекпомикалентной. Во-первых, пробивное напряжение выше в среднем в два раза и составляет 16,1 против 8,3; во-вторых, теплопроводность ее изоляции выше на 25–30%; в-третьих коэффициент линейного расширения изоляции и меди примерно равны, что повышает ее надежность. В эксплуатации стекломиканитовая изоляция усыхает, что приводит к нарушению плотности крепления. Для компенсации усадки изоляции катушек главных и добавочных полюсов между катушками и приливами остова ставят стальную пружинную рамку *2.* (рис. 7.6, *а*). Однако пружинная рамка из-за ограниченного пространства не позволяет добиться необходимой эластичности,

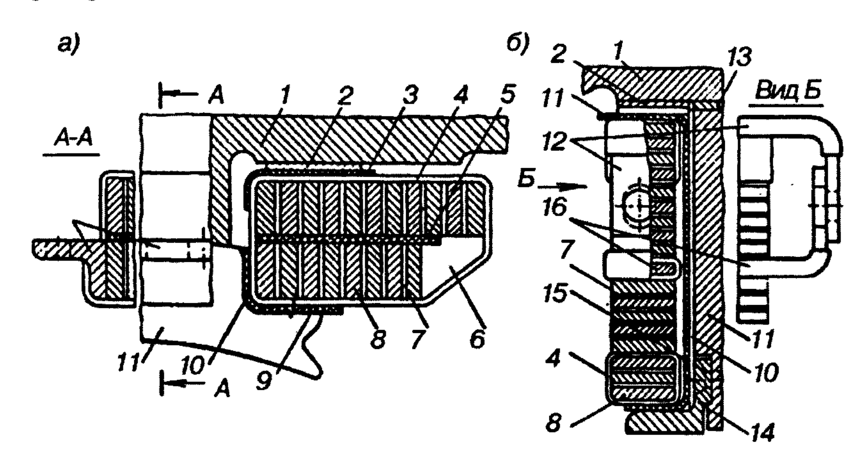


Рис. 7.6. Полюсы тягового электродвигателя ЭД-118Б:

а — главный; б — добавочный; 1 — корпус электродвигателя; 3, 15 — изоляционные каркасы; 4 — корпусная изоляционная катушка; 5 17 — рамки изолирующие; 6 — заполнитель изоляционный; 7 — межвитковая изоляция; 8 — провод катушки; 13 — неметеллическая прокладка; 14 — немагнитный опорный уголок; 16 — пластина подпора катушки

вследствии чего между катушками и выступами полюсных сердечников дополнительно ставят пружинные фланцы. Пружинная рамка и фланец предохраняют корпусную изоляцию от повреждения при вибрации. однако создают двойной воздушный зазор, из-за чего затрудняется отвод тепла от меди обмоток к сердечнику полюса. На тяговых двигателях НБ-418К, ТЛ-2К, РТ-51М не применяют разрезного фланца и пружинной рамки. Для улучшения теплоотдачи от полюсной катушки к сердечнику между остовом и катушкой ставят силуминовую подкладку *4* (рис.7.7).

В наконечниках главных полюсов делают пазы, куда укладывают компенсационную обмотку. Ее применение оправдано для двигателей мощностью $P_{ном}$ > 700 кВт, а также при соотношении частот вращения $n_{max}/n_{ном}$ >2, среднем напряжении между соседними коллекторными пластинами e > 17–18 В, среднем напряжении на 1 см длины окружности коллектора E > 35–40 В/см, толщине изоляции $\delta_{из}$ = 1,2 мм.

Изоляция компенсационной обмотки такая же как и изоляция обмотки главных полюсов. Катушку крепят в пазах текстолитовыми клиньями.

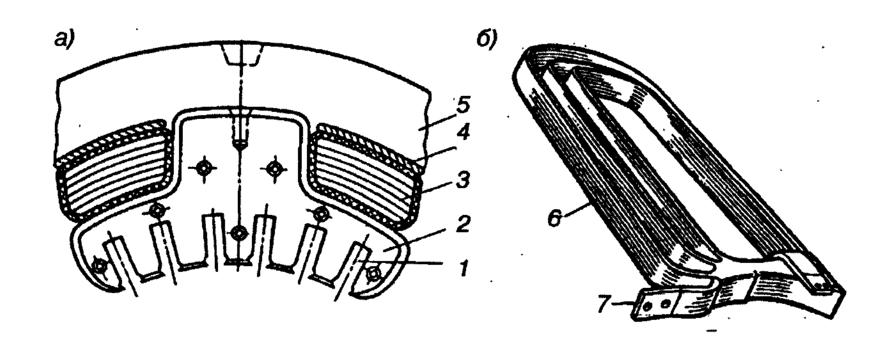


Рис. 7.7. Устройство крепления моноблока главного полюса к остову (а) и компенсационная обмотка (б) тягового двигателя НБ-418К6:

1 — паз для катушки компенсационной обмотки; 2 — сердечник полюса; 3 — кобмотка возбуждения; 4 — силуминовая прокладка; 5 — остов; 6 — катушка компенсационной обмотки; 7 — вывод этой обмотки

7.5.3. Добавочные полюса

Сердечники добавочных полюсов ТЭД тепловозов, электровозов и электропоездов постоянного тока выполняют сплошными из стали в виде отливок или обработанных поковок. В ТЭД пульсирующего тока сердечники добавочных полюсов выполнены шихтованными (НБ-418К, РТ-51Д). Катушка добавочного полюса удерживается на сердечнике при помощи латунных наконечников (угольников). Крепится сердечник к остову болтами. Если сердечник сплошной, то непосредственно в нем выполняют резьбовые отверстия для крепления к остову. При шихтованном сердечнике резьба нарезается как в главных, так и полюсах в стержне, который запрессован в сердечник. Катушка имеет развитую теплоотдающую поверхность, омываемую вентилирующим воздухом, что позволяет допустить плотность тока до 6–8 А/мм^2 (рис. 7.8).

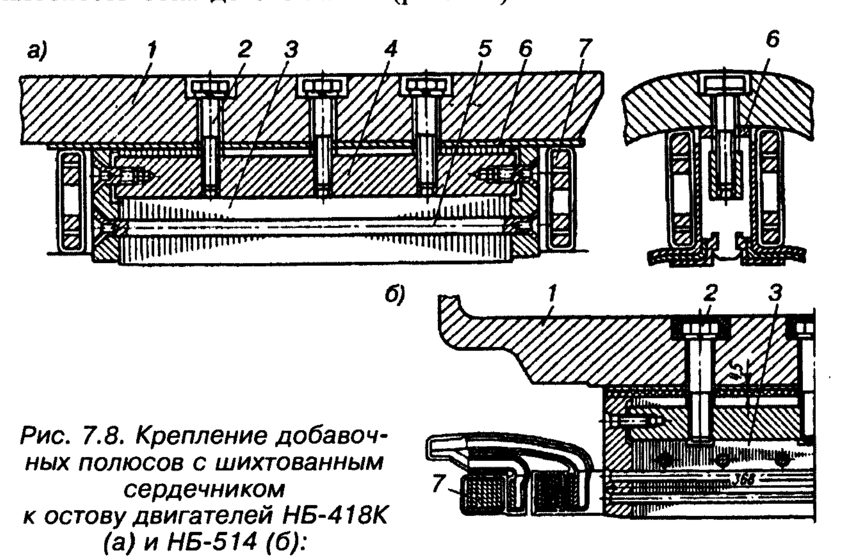


Рис. 7.8. Крепление добавочных полюсов с шихтованным сердечником к остову двигателей НБ-418К (а) и НБ-514 (б):

1 — остов; 2 — болт из немагнитной стали; 3 — шихтованный сердечник (тяговые двигатели НБ-418К и др.); 4 — стержень; 5 — заклепка; 6 — текстолитовая (или латунная) прокладка; 7 — обмотка полюса

Намотку провода катушек выполняют плашмя или на ребро. При намотке катушек плашмя медные шины, располагаясь параллельно боковым стенкам сердечника, выполняют роль экранов для переменной составляющей магнитного потока рассеяния. Однако такие катушки не получили широкого распространения из-за ограниченного габарита двигателя.

В качестве межвитковой изоляции применяется асбест, электронит, пленкосинтокартон толщиной 0,4–0,6 мм. Корпусная изоляция чаще всего выполняется по классу нагревостойкости *F* из стеклослюдинитовой ленты, пропитанной или непропитанной (ЛСКН, ЛСЭК-5,ЛСЭП-934). Если применяется непропитанная лента, то обязательно пропитывают катушки в эпоксидном компаунде или другом компаунде с последующей полимеризацией. Толщина лент 0,09–0,11 мм. Для защиты корпусной изоляции от механических повреждений сверх нее наматывают стеклоленту ЛЭС толщиной 0,5 мм. Если катушка укладывается в обойму, то внутренние поверхности обоймы должны промазываться лаком или компаундом, а затем катушка должна выпекаться пропусканием тока по виткам обмотки. Обычно под покровную изоляцию укладывается пленка из фторопласта, обеспечивающая возможность демонтажа при ремонте.

Между сердечником добавочного полюса и остовом устанавливают диамагнитную подкладку из латуни, алюминия или текстолита, уменьшающую магнитное насыщение.

7.5.4. Якорь

Якорь ТЭД (рис. 7.9) состоит из вала, сердечника, втулки, нажимных шайб, обмотки и коллектора.

Вал ТЭД обычно изготовляют из стали марки 20ХН3А с допустимым напряжением 200 кПа. Он подвергается действию крутящих моментов, вызывающих появление значительных касательных напряжений. На вал действуют силы магнитного притяжения и силы реакции зубчатой передачи, а также масса самого якоря. Во время движения поезда появляются динамические воздействия от неровностей пути, от толчков силы тяги в период пуска и торможения, от ударной нагрузки при выходе колесной пары из состояния боксования.

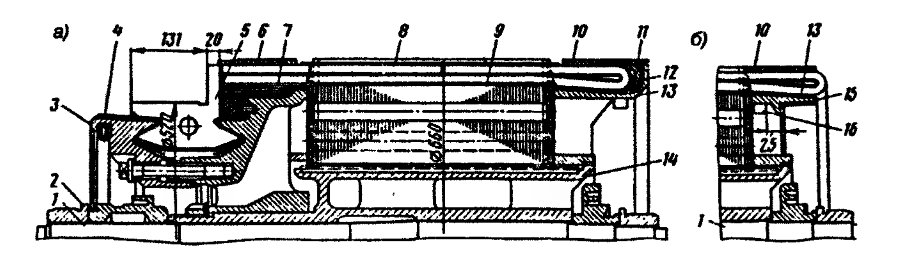


Рис. 7.9. Якоря с микалентной(а) и монолитной (б) изоляцией тяговых двигателей НБ-418К:

1 — вал; 2 — внутреннее кольцо подшипника; 3 — нажимной конус коллектора; 4 — манжета; 5 — коллекторная пластина; 6 и 10 — стеклобандажи; 7 — уравнительное соединение; 8 — проводник обмотки якоря; 9 — сердечник якоря; 11 — заполнитель; 12 — прокладка из гибкого миканита; 13 — задняя нажимная шайба; 14 — втулка якоря; 15 — стеклополотно; 16 — балансировочный груз

Для уменьшения концентрации напряжений валы проектируют с плавными переходами от одной ступени к другой. Пазы для шпонок делают минимальной глубины и протяженности.

Вал обрабатывают по второму классу точности, а затем шлифуют. Особое внимание уделяют обработке переходных галтелей, которые полируют до зеркального блеска.

На вал напрессовывают детали якоря. Благодаря втулке можно производить замену вала без полной разборки якоря. Втулку изготавливают из стали марки 25Л-1, отливкой. Затем ее напрессовывают на вал с натягом 0,13–0,16 мм.

Со стороны, противоположной коллектору, на втулку напрессовывают заднюю нажимную шайбу (см. рис. 7.9). Ее отливают из стали марки 25Л-1. Обычно задние нажимные шайбы изготавливают со специальными фланцами, которые направляют охлаждающий воздух, поступающий из каналов якоря, а также защищают головки лобовых частей обмотки якоря от повреждений. Иногда задние нажимные шайбы выполняют без фланцев. В этом случае улучшается теплоотдача задней лобовой части обмотки якоря.

Передняя нажимная шайба якоря напрессовывается со стороны коллектора. Она имеет большую посадочную поверхность для напрессовки на нее коллектора.

При отсутствии втулки, нажимные шайбы насаживают непосредственно на вал двигателя.

Сердечники якорей изготавливают из отдельных пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Листы покрывают с обеих сторон пленкой бакелитового лака толщиной 0,012–0,014 мм или жидким стеклом. В сердечнике делают пазы для укладки обмотки якоря.

Сердечники якорей двигателя НБ-504А выполнены гладкими без пазов. Обмотки уложены на гладкие полированные поверхности сердечников. Это позволяет значительно уменьшить поток рассеяния коммутируемых секций и их индуктивность, что приводит к снижению реактивной ЭДС в 2–2,5 раза. Но при этом увеличивается воздушный зазор, что требует увеличения МДС главных полюсов. В то же время увеличение воздушного зазора приводит к ослаблению действия реакции якоря.

Внутри сердечника якоря делают вентиляционные каналы, размещенные в шахматном порядке по окружности якоря в 2 или 3 ряда.

Крайние листы сердечника (7–8 листов) делают толще (1 мм). Это позволяет предотвратить распушение листов сердечника.

7.5.5. *Коллектор*

Диаметр коллектора $D_к$ зависит от максимально допустимой скорости V_{kmax}, которая по условиям надежного токосъема равна 60 м/с, а также исходя из максимальных величин механических напряжений:

$$Q < (60\ V_{kmax})/(n_{max}).$$

Число коллекторных пластин K выбирается исходя из допустимых потенциальных условий на коллекторе :

$$K > (2pU)/U_{м\,лср},$$

где $U_{м\,лср}$ — среднее напряжение между пластинами коллектора, равное обычно 17–18 В

Диаметр коллектора должен быть меньше диаметра якоря;

$$D = (0{,}7–0{,}8)D_а\,.$$

Шаг по коллектору недолжен быть менее 4,0–5,0 мм, т.е.

$$n \leq D_k/K > 4{,}0\text{–}5{,}0 \text{ мм},$$

Толщина прокладки между пластинами коллектора обычно равна 1,0–1,3 мм.

Болты, посредством которых скрепляютя элементы коллектора изготавливаются из высокоуглеродистой или легированной стали.

Коллекторные пластины изготавливают из холоднотянутой меди с присадкой кадмия 0,9–1,2% (тяговые двигатели НБ-414Б и др) или серебра 0,07–0,14 % (тяговые двигатели НБ-414М, НБ-418К, ТАО-649 и др.). Это позволяет повысить износоустойчивость коллектора. Для уменьшения массы пластин в них вырубают одно или два круглых отверстия (рис. 7.10).

Коллекторные пластины изолируют друг от друга прокладками из миканита марок КФГ и КФШ-1. Толщина их колеблется от 0,8 до 1,5 мм и зависит от межламельного напряжения (напряжения между соседними коллекторными пластинами). С нижней стороны «ласточкин хвост» коллекторных пластин изолирован от стальных конусов миканитовыми манжетами марок

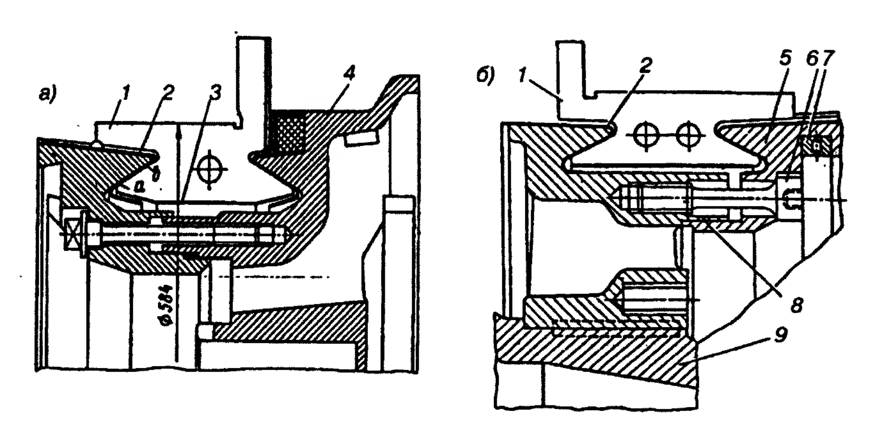


Рис. 7.10. Коллекторы двигателей НБ-418К (а) и AL-4442пР (б):

1— коллекторная пластина; 2 — изоляционная манжета: 3 — изоляционный цилиндр. 4, 8 — корпус ; 5 — конус нажимном: 6 — болт; 7 — балансировочный груз; 9 — фланец, прикрепленный к втулке якоря

ФФ2А. ТФП18,ФМПА, ФФПА на термореактивных лаках. Манжеты не должны отличаться по толщине более чем на 0,05мм.

Внутренняя воздушная изоляционная камера, которая образуется нажимными шайбами, конусом и коллекторными пластинами должна быть герметичной, чтобы не попадала влага и не возникал электрический пробой.

С целью уменьшения массы и габаритов якоря и повышения их частоты вращения созданы конструкции коллекторов с бандажными кольцами, допускающими в 1,3–1,5 раза большие частоты вращения по сравнению с обычными коллекторами с «ласточкиными хвостами».

7.5.6. Обмотка якоря

В ТЭД применяют простые петлевые и простые волновые обмотки. Простые волновые обмотки наиболее просты в изготовлении. Эти обмотки не требуют уравнительных соединений. Однако простые волновые обмотки применяют в двигателях, если ток якоря не превышает 350–400 А. С увеличением тока якоря ухудшаются потенциальные условия из-за увеличения реактивной ЭДС, что ухудшает коммутацию. Вследствии этого при токах превышающих 300–350 А применяют простые петлевые обмотки. В простой петлевой обмотке снижаются межламельные напряжения (на 12 В) и реактивная ЭДС (на 0,5 В), что облегчает условия коммутации.

Обмотку изготавливают из отдельных катушек, выполненных из шинной меди.

Задние лобовые части обмотки якоря могут выполняться закрытыми (рис. 7.11, *а*) и открытыми (рис. 7.11, *б*). При закрытой лобовой части повышается ее влагостойкость и предотвращается возможность механических повреждений при сборке и разборке ТЭД. Но, изготовление такой конструкции более трудоемко, а также ухудшает ее охлаждение. Открытое исполнение головок задних лобовых частей якоря позволяет снизить нагрев обмоток на 10–15° С, из-за лучшей теплоотдачи обмоток.

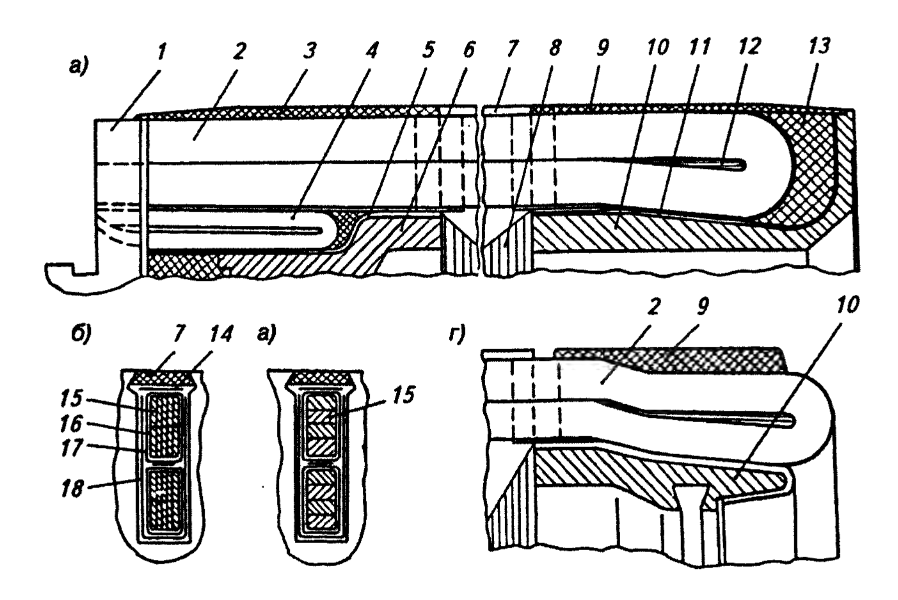


Рис. 7.11. Конструкция обмотки якоря:

1 — коллектор; 2 — обмотка якоря (катушка); 3 — стеклобандаж; 4 — уравнитель; 5 — изоляция передней нажимной шайбы; 6 — передняя нажимная шайба; 7 — клин; 8 —сердечник якоря; 9 — стеклобандаж; 10 — задняя нажимная шайба; 11 — изоляция задней нажимной шайбы; 12 — прокладки изоляционные; 13 — заполнитель; 14 — прокладка; 15 — проводник обмотки якоря; 16 — вит

Открытое исполнение задних лобовых частей обмоток якоря применяют при монолитной изоляции (пропитке изоляции в эпоксидном или другом термореактивном компаунде).

Прямоугольные проводники обмотки якоря располагают вертикально (рис. 7.12, *а*). Если проводников много, то изоляция занимает большую часть паза. В этом случае ухудшается теплоотдача от медных проводников к стенкам паза. Если высота проводников превышает 10,8–14,5 мм, то их делят по высоте на две части (рис. 7.12, *б*), а в некоторых случаях и на три. Проводники якоря тягового двигателя НБ-418К располагают плашмя (рис. 7.12, *в*). Это улучшит теплоотдачу, что позволит увеличить допустимую температуру нагрева и

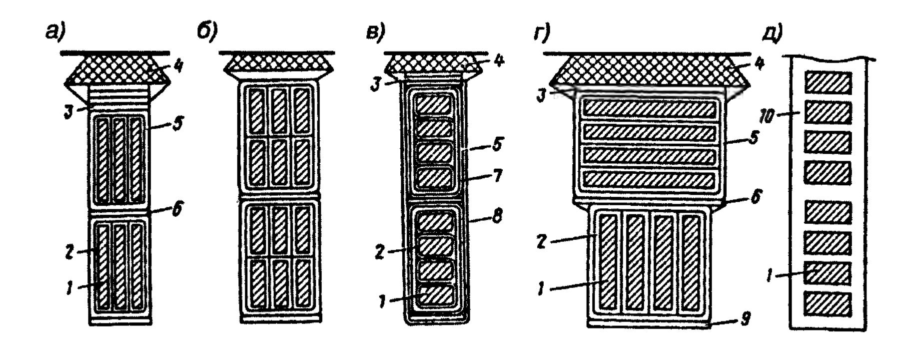


Рис. 7.12. Расположение проводников о пазах сердечников якорей:

1 — проводник; 2 — *витковая изоляция;* 3, 6 и 9 — *прокладки;* 4 — клин; 5 — *корпусная изоляция: 7— покровная изоляция;* 8 — *общая покровная изоляция;* 10 — *монолитная изоляция*

уменьшить диаметр сердечника якоря, т.е. вписать в данный габарит на 7–10% большую мощность, по сравнению с вертикальным расположением проводников при такой же температуре нагрева.

В то же время вертикальная укладка позволяет выполнить соединение концов проводников с петушками коллектора без предварительного их расплющивания и перекручивания перед входом в шлиц коллектора. Горизонтальная укладка требует перекручивания проводников на 90° перед входом в шлиц коллектора, что приводит к удлинению передней лобовой части на 10–15 мм.

В некоторых зарубежных тяговых двигателях (например, французских) электровозов переменного тока проводники располагают по схеме рис. 7.12, *г*. В пазу образуется ступень. Нижняя часть паза уже, что увеличивает сечение зубцов. В этом случае уменьшаются потери в меди обмоток, но приходится выкручивать проводники в их лобовых частях.

При вертикальном расположении проводников в пазу витковая изоляция состоит из микаленты ЛФЧ-Б толщиной 0,075 мм; корпусная изоляция катушки — из микаленты ЛФЧ-ББ толщиной 0,1 мм.

Количество слоев, наматываемых в полуперекрышу, зависит от напряжения на коллекторе. Для классов Н и С применяются провода с полиамидной изоляцией марки ППИПК-1 и ППИПК-2. Корпусная изоляция класса F выполняется из стеклослюдинитовой ленты марки ЛСЭК-5ТПл и ЛСКН, толщиной 0,09–0,11 мм. Затем обмотки якорей пропитывают различными лаками и компаундами. Это повышает электрическую прочность. влагостойкость, теплопроводность и монолитность.

Между корпусной и покровной изоляцией накладывают слой фторопласта или полиэтилентерефталата, что позволяет производить демонтаж секций из паза при ремонте, а при технологической операции нагрева предотвращает вытекание связующего. Для предотвращения повреждения изоляции катушек при укладке в пазы устанавливают изоляционные гильзы из формованного стеклопласта толщиной 0,17–0,2 мм.

Обмотку якоря в пазах закрепляют текстолитовыми клиньями, а лобовые части крепят проволочными бандажами или стеклобандажами. Проволочные бандажи изготавливают из луженой стальной проволоки, которую наматывают в два слоя, скрепляют вспомогательными жестянными скобами и пропаивают оловянисто-свинцовым припоем ПОС-40. Однако бандажи из стеклоленты обладают более высокой прочностью.

Уравнительные соединения чаще всего устанавливают со стороны коллектора, но иногда с противоположной стороны. Если уравнительные соединения расположены со стороны коллектора, то их подсоединяют к коллекторным пластинам, к тем же шлицам петушков, в которые вводятся и концы проводников якоря. Если же уравнительные соединения находятся с противоположной стороны, то их располагают под задней нажимной шайбой, а подключают к головкам секции скобами.

7.5.7. Подшипниковые щиты

По расположению в машине различают передние подшипниковые щиты (со стороны коллектора) и задние (с противоположной стороны). Обычно подшипниковые щиты (рис. 7.13) изготавливают из стали 25Л1. Их

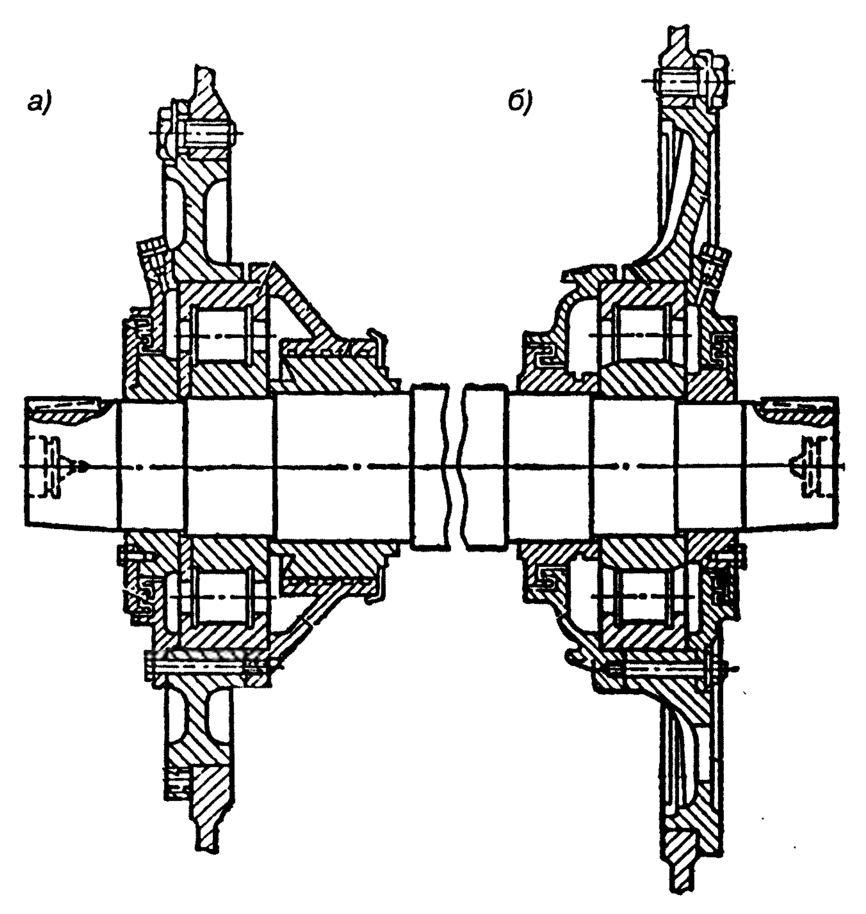


Рис. 7.13. Подшипниковые щиты тягового двигателя НБ-406 со стороны коллектора (а) *и противоположной стороны* (б)

плотно пригоняют к выточкам в остове. Через подшипниковые щиты на остов передаются усилия от массы якоря и усилия, возникающие во время тягового режима локомотива. Подшипниковые щиты крепят к остову болтами с шайбами, которые предохраняют их от самоотвертывания. В щитах имеются специальные отверстия с резьбой, куда ввертываются отжимные болты, необходимые при снятии щитов. В качестве якорных подшипников применяют однорядные роликовые подшипники.

Наружные кольца роликовых подшипников запрессовывают в подшипниковые щиты в холодном состоянии, а внутренние сажают на вал в нагретом (до 100–110°С) состоянии.

В качестве смазки роликовых подшипников применяют ЖРО, 1-ЛЗ и др.

Для предотвращения попадания смазки внутрь двигателя применяют лабиринтные уплотнения: горизонтальные *6* (рис. 7.13) и вертикальные *20*.

7.5.8. Щетки, щеткодержатели и траверса

Если число щеткодержателей шесть и более, то их крепят на траверсе (рис. 7.14), которую можно поворачивать во время осмотра двигателя. Траверсы позволяют производить осмотр и смену электрощеток,

Траверса (см. рис. 7.14) представляет собой разрезное кольцо швеллерного сечения. Наружный обод этого кольца — это зубчатый венец, который находится в зацеплении с шестерней поворотного механизма, расположенной на остове тягового двигателя. Шестерней осуществляется поворот траверсы. На траверсе имеются резьбовые отверстия, в которых крепят пальцы *2* кронштейна *3*. Кронштейны одноименных полюсов присоединяют к расположенным на внутреннем ободе траверсы медным шинам, изолированным друг от друга и от корпуса траверсы. Верхние кронштейны щеткодержателей *4* соединяют кабелями с выводами двигателя.

В остове двигателя траверса закреплена фиксатором, установленным против верхнего коллекторного люка, и прижата к подшипниковому щиту двумя стопорными устройствами;

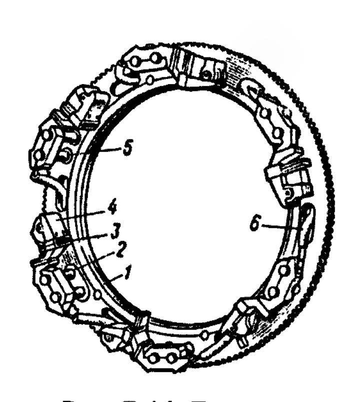


Рис. 7.14. Траверса тяговых двигателей НБ-418К и ТЛ-2К1:
1 — венец;
2 — кронштейн;
3 — щетки;
4 — щеткодержатель;
5 — палец кронштейна;
6 — кабель

одно из них расположено внизу двигателя, а другое — со стороны подвески двигателя к раме тележки. Разжимное устройство *5*, расположенное против нижнего коллекторного люка, позволяет изменять размер щели *6* кольца *1*: вращая шпильку, можно обеспечить размер щели не менее 5 мм в рабочем положении и не более 2 мм, когда требуется осуществлять проворот траверсы для осмотра щеткодержателей и смены электрощеток. Проворачивать траверсу допускается только до места, где кольцо имеет разрез.

После окончания осмотра щеткодержателя траверсу необходимо установить в рабочее положение : должны совпадать риски, нанесенные на траверсе и остове. Затем необходимо закрепить кабели, разжать траверсу и закрепить фиксаторы и стопорные устройства.

Конструкция щеткодержателей может быть различной. На рис. 7.15 показаны щеткодержатели ТЭД электровозов, и электропоездов.

Щетка, помещенная в окно щеткодержателя, может перекашиваться. Это приводит к нарушению контакта между щеткой и коллектором. Кроме того, из-за перекашивания щетки возникает

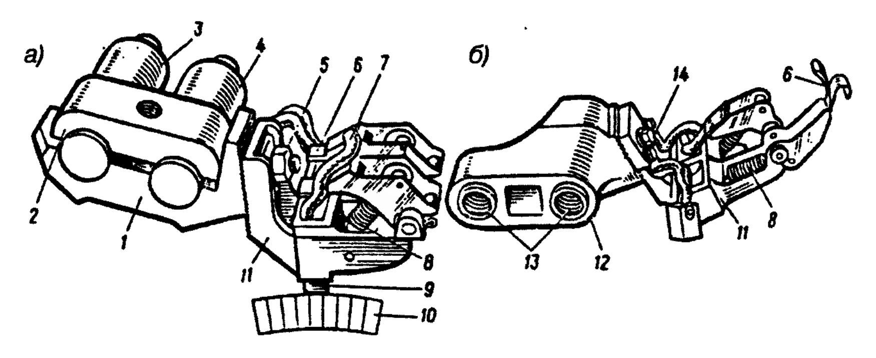


Рис. 7.15. Кронштейны с пальцами и щеткодержателями тяговых двигателей ТЛ-2К, НБ-412К(а) и ДК-106Б, УРТ-110А, РТ-51Д:

1, 2 — верхняя и нижняя половина кронштейна; 3 и 4 — пальцы кронштейна; 5 — гайка; 6 — нажимной палец; 7 — гибкий шунт; 8 — цилиндрическая пружина; 9 — щетка; 10 — коллекторные пластины; 11 — латунный корпус щеткодержателя; 12 — кронштейн из стеклопластика; 13 — стальные пальцы с резьбовыми отверстиями для кронштейна к остову; 14 — болт

касательная составляющая силы нажатия, способная повернуть щетку и прижать ее нижнюю часть к кромке окна щеткодержателя, что нарушит коммутацию ТЭД.

Корпус щеткодержателя тягового двигателя ЭД-118Б (рис. 7.16) изготовлен из латуни и крепится через изоляторы к разъемным кронштейнам, приваренным одной половиной к торцевой стенке корпуса двигателя. В щеткодержателе применена спиральная пружина. Нажатие на щетку составляет 41–47 Н и регулируется поворотом втулки, находящейся в центре пружины. Для щеток в корпусе выполнены два гнезда. В каждое гнезда вставляют по одной паре щеток. Щетки марки ЭГ-61, разрезные, размером 2(12,5×40×30) мм с резиновыми аморти-

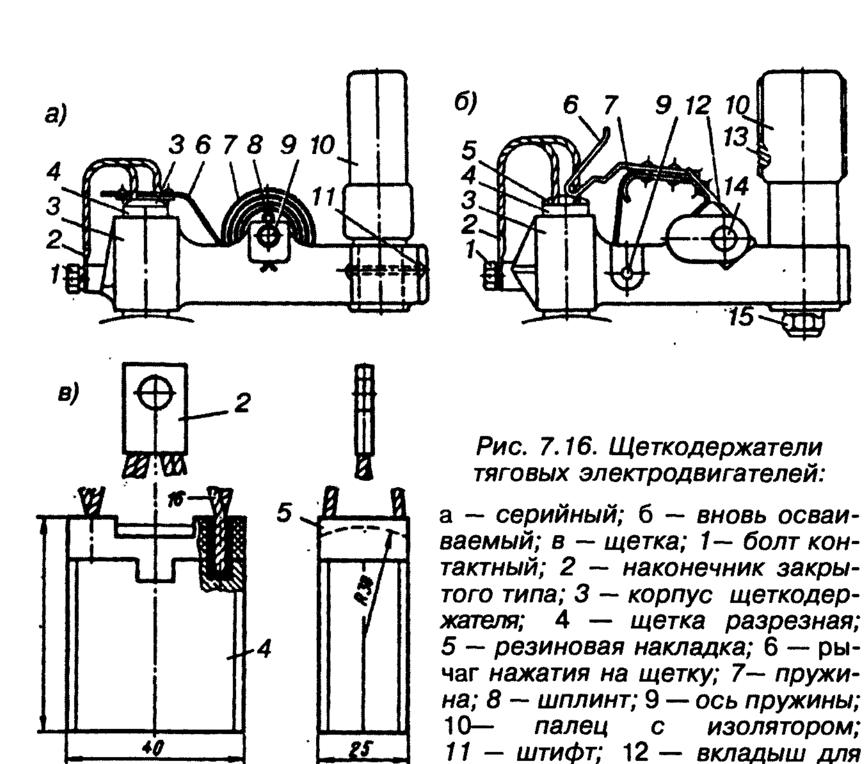


Рис. 7.16. Щеткодержатели тяговых электродвигателей:

а — серийный; б — вновь осваиваемый; в — щетка; 1— болт контактный; 2 — наконечник закрытого типа; 3 — корпус щеткодержателя; 4 — щетка разрезная; 5 — резиновая накладка; 6 — рычаг нажатия на щетку; 7— пружина; 8 — шплинт; 9 — ось пружины; 10— палец с изолятором; 11 — штифт; 12 — вкладыш для вращения и фиксации рычага; 13 — рифленная привалочная поверхность; 14 — ось рычага; 15 — гайка; 16 — гибкий провод (шунт)

заторами *5* (рис. 7.16, *в*) обеспечивающими демпфирование вибраций и уменьшение износа коллектора. Щетки с гибкими медными шунтами соединяют болтами с корпусом щеткодержателя. Для удобства замены, а также осмотра щеток на щеткодержателях имеются спайки с заплечиками, посредством которых можно фиксировать пружины в приподнятом состоянии.

Щеткодержатель тягового двигателя РТ-51Д состоит из корпуса и нажимного устройства. Кронштейн щеткодержателя изготавливается из пластмассы марки АГ-4В, в который армированы стальные втулки с резьбой для крепления его двумя болтами к остову двигателя. Кроме того, кронштейн армирован каркасом со стальной гребенкой для сочленения с корпусом щеткодержателя. Так же гребенкой выполнена поверхность корпуса. Это предотвращает от смещения корпус. а также позволяет плавно регулировать зазор между коллектором и корпусом.

Нажимное устройство состоит из нажимного пальца *2*, винтовой пружины *3* и оси *4*. Оно собрано на оси, которую крепят в отверстии корпуса щеткодержателя с помощью шплинта.

Корпус щеткодержателя тягового двигателя НБ-412К, НБ-418К (см. рис. 7.15, *а*) отливают из латуни ЛС-59-1Л или ЛК-80-ЗЛ. Кронштейн изготавливают из стали. Он состоит из двух половин *1* и *2*, скрепленных болтом. Каждая половина кронштейна имеет по две выточки для охвата пальцев *3* и *4*. Пальцы изготовлены из стальных стержней переменного сечения, спрессованные пресс-массой АГ-4. Такие пальцы имеют блестящую гладкую поверхность светло-коричневого цвета. Один конец пальца ввинчивается в траверсу, а на другой насаживают кронштейн.

Нажатие на каждую щетку осуществляется раздельно пружинными пальцами. Под воздействием цилиндрической пружины нажатие практически сохраняется постоянным независимо от износа щетки. Пружина работает на растяжение и закреплена одним концом на оси в корпусе щеткодержателя, а другим — на оси на нажимном пальце *6* винтом.

Давление нажимного пальца должно быть строго определенным. При большом давлении увеличивается износ щеток и нагрев коллектора, а при меньшем ухудшится контакт между щеткой и коллектором, что может привести к усиленному искрению, а иногда к перебросам и круговому огню.

7.6. *Примеры конструктивного выполнения тяговых электродвигателей*

В приложении 2 приведены данные некоторых тяговых двигателей. Коллекторные тяговые двигатели имеют много общего по конструктивному решению узлов.

7.6.1. *Тяговый электродвигатель* ЭД-118А

ТЭД с опорно-осевым подвешиванием (рис. 7.17). Частота вращения регулируется изменением напряжения тягового генератора в диапазоне от 300 до 700 В, а также ослаблением возбуждения. Реверсирование осуществляется переключением полярности включения обмотки возбуждения.

Магнитная система состоит из литого остова *12* восьмигранной формы отлитого из стали 25А и установленых в нем четырех главных и четырех добавочных полюсов, четырех щеткодержателей *6* и двух подшипниковых щитов *4* и *15*,

В остове предусмотрены со стороны коллектора раструб для подачи воздуха, а для осмотра и обслуживания щеток имеются три люка. К торцевой стенке корпуса со стороны коллектора приварены четыре кронштейна для крепления щеткодердержателей.

Сердечник главного полюса изготовлен из штампованных листов низкоуглеродистой стали марки 08КП, толщиной 2 мм и скрепленных заклепками. Для улучшения коммутации зазор между полюсным наконечником и якорем сделан эксцентричным. Катушка главного полюса выполнена в виде двух шайб прямоугольным медным проводом с намоткой плашмя, с изоляцией класса F.

Сердечники добавочных полюсов изготовлены из стального проката. Катушка добавочного полюса выполнена также прямоугольным медным проводом, намотанного в один слой на ребро. Три витка со стороны якоря и четыре витка со стороны остова изолированы, а остальные десять витков не изолированы. Это сделано для лучшей теплоотдачи. Изоляция класса F. В собранном виде добавочные полюсы с обмотками возбуждения пропитывают в эпоксидном компаунде.

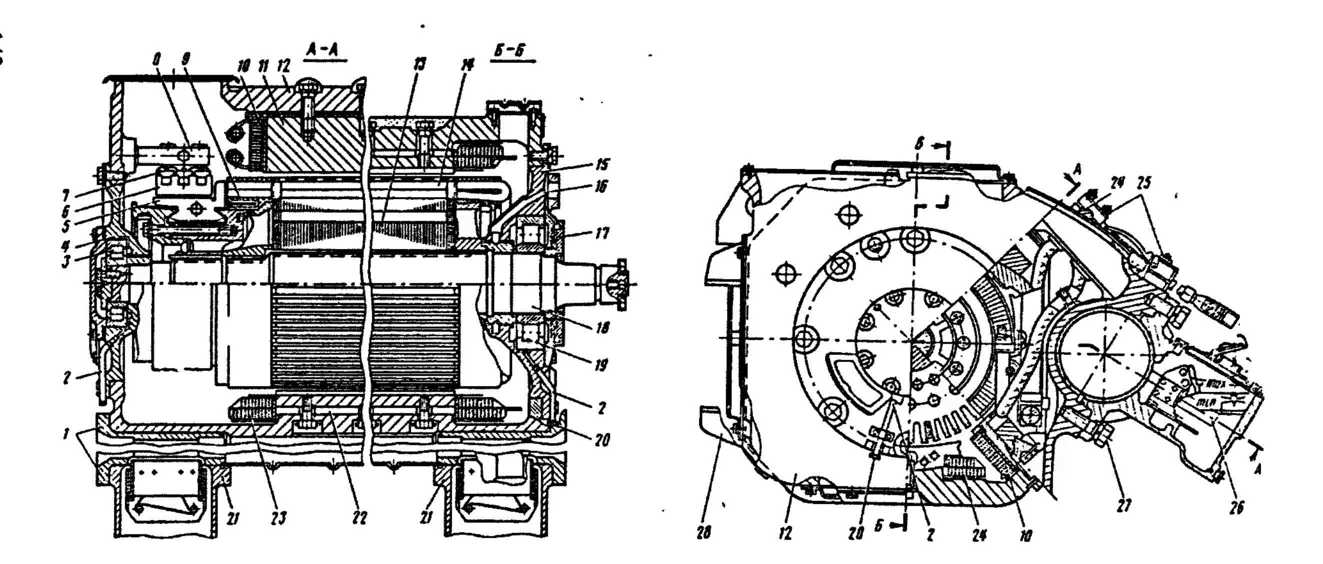


Рис. 7.17. Тяговый электродвигатель ЭД-118А:

1 — *вкладыши моторно-осевого подшипника;* 2 — *трубки подачи смазки;* 3 — *роликовый подшипник передний;* 4 — *щит подшипниковый передний;* 5 — *коллектор;* 6 — *щеткодержатель;* 7 — *изолятор;* 8 — *кронштейн;* 9 — *уравнительные соединения;* 10 — *катушка добавочного полюса;* 11 — *добавочный полюс;* 12 — *остов;* 13 — *сердечник якоря;* 14 — *обмотка якоря;* 15 — *щит подшипниковый задний;* 16 — *дренажное отверстие;* 17 — *уплотнительное лабиринтное кольцо;* 18 — *вал;* 19 — *роликовый подшипник задний;* 20 — *пробки трубок подачи смазки;* 21 — *корпус (шапка) моторно-осевого подшипника:* 22 — *главный полюс;* 23 — *катушка главного полюса;* 24 — *выводной провод;* 25 — *клицы;* 26 — *фитиль;* 27 — *болты;* 28 — *опорные выступы ("носики")*

Якорь состоит из вала, на который напрессован сердечник, нажимных шайб. коллектора и обмотки. Сердечник набран из отдельных пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм, изолированных с двух сторон. В сжатом состоянии сердечник удерживается с помощью нажимных шайб, насаженных на вал с натягом. Шесть крайних листов для жесткости сварены по наружной поверхности зубцов. В сердечнике выполнены 32 аксиальных вентиляционных канала. В пазы сердечника уложена простая петлевая обмотка. На обмоткодержателе со стороны коллектора расположены уравнительные соединения.

Коллектор арочного типа, состоит из клиновидных медных пластин, миканитовых прокладок, нажимного конуса, двух миканитовых манжет и стяжных болтов. Для уменьшения массы коллекторных пластин в них выштампованы круглые отверстия. Коллекторные пластины с секциями якорной обмотки соединяют точечной сваркой.

Для предотвращения попадания влаги под коллекторные пластины на выступающий конец коллекторной манжеты наложен стеклобандаж.

В ТЭД применены щетки марки ЭТ-61А с резиновыми накладками.

7.6.2. Тяговый электродвигатель НБ-418К6

Двигатель применяется в электровозах ВЛ80$_к$, ВЛ80$_т$, ВЛ80$_с$, ВЛ80$_р$. Он выполнен шестиполюсным, с опорно-осевым подвешиванием (рис. 7.18).

Остов *1*, цилиндрической формы, отливают из стали 25Л11с высокой магнитной проницательностью. Внутреннюю поверхность остова, кроме мест посадки сердечников полюсов, покрывают серой электроэмалью FO-92-XC. Со стороны коллектора в остове выполнен вентиляционный люк *19*, через который проходит охлаждающий воздух, а с противоположной стороны от коллектора сделан выходной патрубок. В верхней и нижней частях остова предусмотрены два смотровых люка, плотно закрываемые крышками. Крышка верхнего люка *8* имеет имеет пружинный замок, а нижний люк крепится к остову болтами.

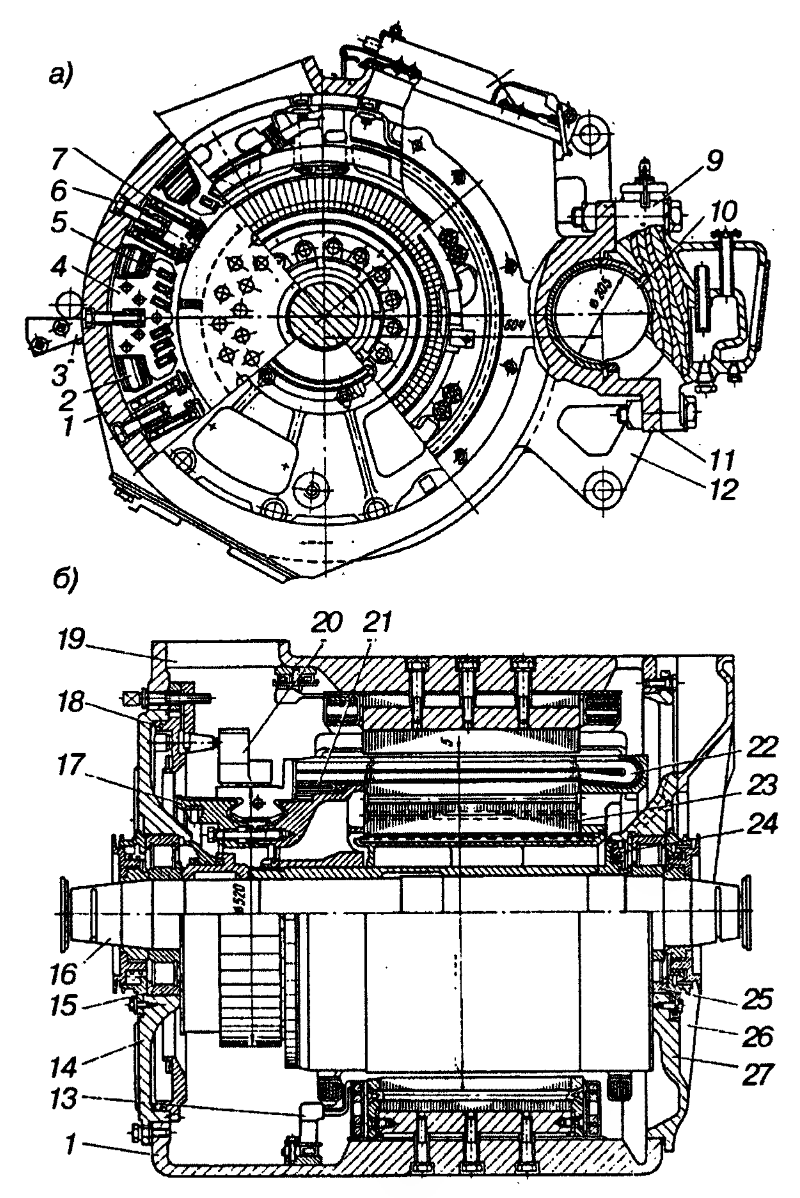


Рис. 7.18. Поперечный (а) и продольный (б) разрезы тягового двигателя НБ-418К6, электровозов ВЛ80[к], ВЛ80[т], ВЛ80[р], ВЛ85)

Главные *4* и добавочные *6* полюса крепятся к остову с помощью болтов, которые изготовлены из стали 35ХГСА. Для предотвращения от самоотвинчивания под головки болтов установлены пружинные шайбы.

На торцевой стенки остова со стороны коллектора укреплены устройства стопорения, фиксации и поворота траверсы *18*, Торцевые стенки остова закрыты подшипниковыми щитами *14*, *27* с роликовыми подшипниками *15*, *25* тяжелой серии.

Для предотвращения утечки смазки из подшипниковых камер установлены лабиринтные уплотнения *24*, которые через дренажные отверстия сообщаются с атмосферой, позволяющие выравнивать давление в подшипниковых камерах до атмосферного и предотвращает выдавливание смазки разностью давлений, которые создается благодаря нагнетанию воздуха внутрь ТЭД от мотор-вентилятора.

Сердечники главных полюсов *4* выполнены шихтованными из электротехнической стали. В башмаке сердечника имеются шесть открытых пазов, в которое уложена компенсационная обмотка *5*. Катушки компенсационной обмотки закреплены текстолитовыми клиньями.

Болты ввинчены в стальной стержень, который запресован в сердечник.

Сердечники добавочных полюсов *6* набраны из штампованных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, изолированных лаковой пленкой. Между остовом и сердечником установлена текстолитовая прокладка толщиной 7 мм. На сердечнике в специальных пазах прикреплены опорные кронштейны из латуни для крепления катушек, Каждая катушка добавочного полюса содержит по 8 витков, выполненных из медного провода квадратного сечения.

Для повышения монолитности изоляция катушки главных полюсов после изолирования выпекают в специальных приспособлениях, а для повышения влагостойкости покрывают эмалью ЭП-91.

Электрическое соединение катушек полюсов внутри остова выполнено изолированными медными шинами *13* катушки добавочных полюсов и гибким проводом ПЩ.

Якорь ТЭД состоит из сердечника *23* коллектора и обмотки, уложенной в пазы сердечника. Сердечник выполнён из штампо-

ванных листов электротехнической стали 2212 толщиной 0,5 мм и напрессован на коробчатую втулку. Каждый лист сердечника покрыт с обеих сторон лаком КФ 965. Для устранения «распушения» зубцов крайние листы выполнены из стали Ст 2 толщиной 1 мм и попарно сварены точечной контактной сваркой.

Задняя нажимная шайба изготовлена из стали 25 Л1 и представляет собой два кольца, соединенных ребрами. Внутреннее кольцо является втулкой для посадки на вал, а наружное — упором для сердечника обмоткодержателя. Головки обмотки якоря для защиты от механических повреждений с торцов закрыты защитным фланцем.

Передняя нажимная шайба объединена со втулкой коллектора.

В коллекторе арочного типа коллекторные пластины изготовлены из меди с присадкой серебра. Для уменьшения массы пластин в них выштампованны отверстия диаметром 30 мм. Изоляция пластин — коллекторный миканит КФШ-1 толщиной 1,4 мм. Изоляционные манжеты изготовлены из миканита толщиной 1 мм.

Обмотка якоря *22* простая петлевая, с уравнителями 1-го рода *21*, которые расположены на стороне коллектора под катушками якоря.

Обмотка якоря в пазах сердечника закреплена текстолитовыми клиньями, а лобовые части — стеклобандажами.

Для повышения влагостойкости обмотку якоря трижды пропитывают в лаке ФЛ — 95, в том числе один раз — вакуумно-нагнетательным способом.

Контрольные вопросы

1. Каковы условия работы ТЭД?
2. Что собой представляет часовой режим ТЭД?
3. В каких случаях применяют остовы цилиндрической формы?
4. Каково назначение траверсы?
5. Какое возбуждение применяют в ТЭД?
6. Для чего применяют пружинные рамки?
7. Для какой цели в коллекторных пластинах выштамповывают круглые отверстия?
8. Каково назначение изоляционных пальцев в щеткодержателе?

Глава 8.

Вспомогательные и специальные машины постоянного тока

8.1. Общие сведения

Электрические машины обслуживающие собственные нужды электровозов, электропоездов, тепловозов и дизель-поездов, называют *вспомогательными машинами.* В электропоездах и дизель-поездах вспомогательные машины обычно располагаются под кузовом, а в электровозах и тепловозах — внутри кузова.

Для пневматических тормозов поезда, а также для привода электрических аппаратов электровозов, тепловозов, дизель-поездов и электропоездов необходим сжатый воздух, для их получения устанавливают компрессоры со специальным двигателем. На некоторых тепловозах приводом компрессора является дизель. Компрессор с электродвигателем называют *мотор-компрессором.*

Для охлаждения тяговых двигателей, а в некоторых случаях пусковых реостатов, выпрямительных установок, сглаживающих и переходных реакторов, применяют *мотор-вентиляторы.*

Для питания цепей управления, освещения и зарядки аккумуляторных батарей применяют пониженное напряжение. Его вырабатывает специальный генератор управления (электровозы и электропоезда) или вспомогательный генератор (тепловозы и дизель-поезда).

При рекуперативном торможении для питания обмоток тяговых двигателей электровозов постоянного тока применяют преобразователи, состоящие из двигателя и генератора.

На тепловозах с электрической передачей постоянного тока для питания независимой обмотки возбуждения тягового генератора применяют возбудители. Их применяют также и на тепловозах с электрической передачей переменного тока.

8.2. Возбудители и вспомогательные генераторы тепловозов

Для питания независимой обмотки возбуждения тягового генератора постоянного тока тепловозов с электрической передачей применяют возбудители, которые объединены с вспомогательным генератором в двухмашинный агрегат. Вспомогательный генератор предназначен для питания цепей управления, освещения и зарядки аккумуляторных батарей.

Корпус агрегата А 706Б (рис. 8.1) цилиндрической формы, в котором корпусы возбудителя В600 и вспомогательного генератора ВГТ 275/150 соединены друг с другом болтами.

Подшипниковые щиты представляют собой сварные, ребристые конструкции.

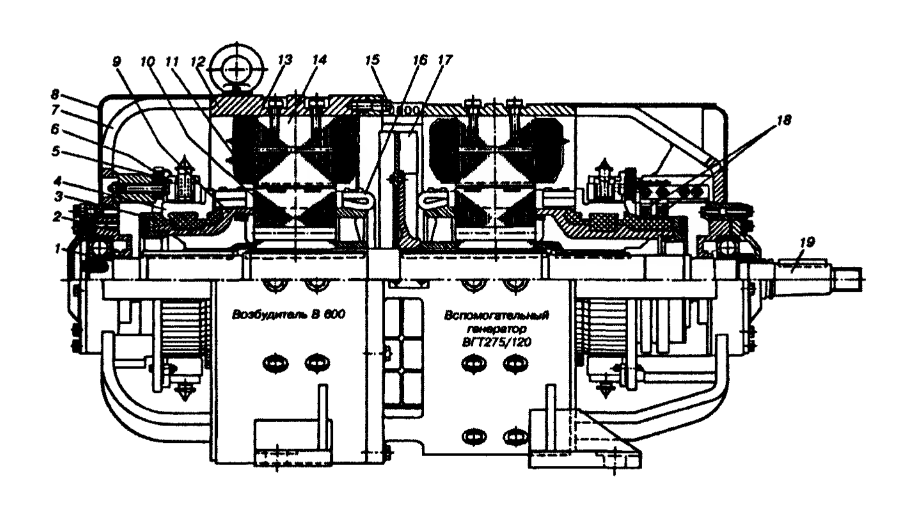


Рис. 8.1. Двухмашинный агрегат типа А706Б:

1 — подшипник; 2 — капсула; 3 — пластмасса; 4 —коллектор; 5— траверса; 6 — щеткодержатель; 7 — подшипниковый щит; 8 — крышки; 9 — втулка; 10 — сердечник якоря; 11— размагничивающая катушка; 12 — корпус; 13 — катушка независимого возбуждения; 14 — сердечник главного полюса; 15 — болты, соединяющие корпуса машины; 16 — обмотка якоря; 17 — вентилятор; 18 — контактные кольца; 19 — вал

К корпусу прикреплены сердечники главных и добавочных полюсов. Возбудитель имеет четыре, а вспомогательный генератор — пять добавочных полюсов.

Катушки главных полюсов возбудителя имеют по две обмотки возбуждения: независимую и размагничивающую. Катушки главных полюсов вспомогательного генератора имеют только одну параллельную обмотку. Сердечники главных полюсов выполнены шихтованными — из отдельных стальных пластин, а сердечники добавочных полюсов — стальные, литые. Добавочные полюсы возбудителя и вспомогательного генератора — взаимозаменяемы.

Вал *19* якорей обеих машин — общий. Он приводится во вращение от вала дизеля. Обе машины имеют одинаковое количество коллекторных пластин, пазов якоря, а также одинаковые размеры паза и длину сердечника. Сердечник якоря изготовлен из отдельных листов электротехнической стали. Обмотки обеих машин волновые. Лобовые части обмоток закреплены проволочными бандажами. Коллектор неразъемного типа.

Схема соединения обмоток машин приведена на рис. 8.2.

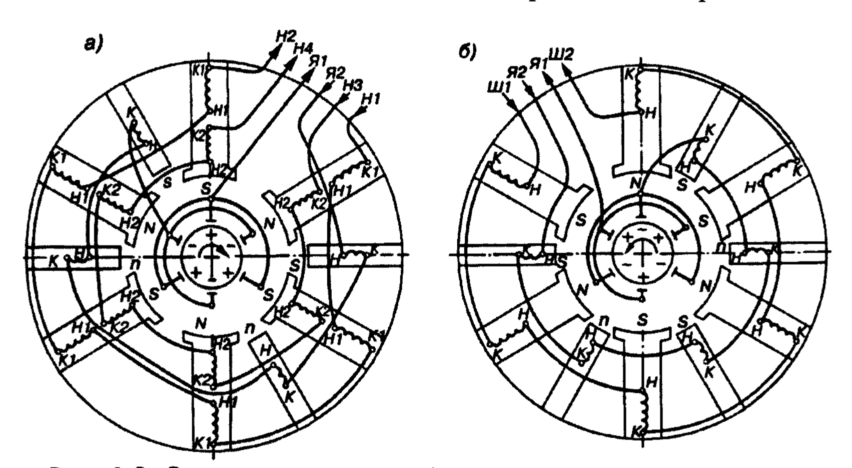


Рис. 8.2. Схема соединения обмоток машин агрегата А706А:

а — возбудитель В600; б — вспомогательный генератор ВГ 275/120; обозначение начала и конца катушек и обмоток: Н *и* К, Н1 *и* К1, Н2 *и* К2 — *катушек полюсов;* Н1 *и* Н2 — *обмоток независимого врзбуждения; Н3 и Н4 — размагничивающий: Ш1 и Ш2 — параллельные*

Вентилятор расположен в средней части агрегата. Всасываемый воздух через открытые нижние части подшипниковых щитов проходит между полосами и через отверстия в сердечнике якоря, а затем через вентиляционные люки выбрасывается в атмосферу.

Возбудитель МВТ25/9 и вспомогательный генератор МВТ25/11 применяют на маневровых тепловозах ТЭМ2, ТЭМ3. В этом агрегате для получения гиперболической характеристики тягового генератора используют возбудители с расщепленными полюсами. Благодаря расщепленным полюсам получают две независимые магнитные системы: насыщенную и ненасыщенную.

В передачах мощности применяют два типа возбудителей: с продольным (аксиальным) и поперечным (радиальным) расщеплением полюсов. В возбудителе МВТ 25/9 применен первый тип — аксиальное расщепление полюсов, которых в указанном возбудителе четыре (рис. 8.3). Сердечники полюсов разделены на две неравные части. Насыщенная часть имеет меньший размер. На сердечнике имеются магнитные мостики в виде вырезов на сердечнике и стальных пластин между сердечником и корпусом. Каждый главный полюс имеет по две обмотки возбуждения: одна из обмоток, называемая *независимой,* охватывает обе части сердечника и питается от вспомогательного

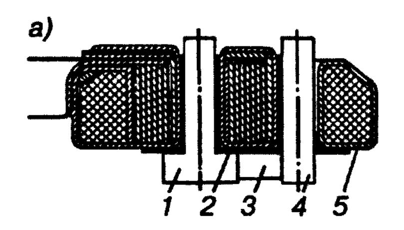


Рис. 8.3. Расщепленные полюса:

а — возбудителя МВТ 25/9; б — возбудителя ВТ 275/120; 1, 4 — сердечники полюса; 2, 12 — дифференциальные обмотки; 3 — латунная проставка; 5, 9 — обмотка независимого возбуждения; 6, 7, 8 — последовательная, ограниченная и регулировочная обмотки; 10 — сердечник ненасыщенного полюса; 11 — добавочный полюс; 13 — параллельная обмотка; 14 — сердечник насыщенного полюса

генератора и якоря самого возбудителя, а другая — *дифференциальная*, намотанная на насыщенную часть сердечника. Независимая обмотка содержит 242 витка из изолированного медного провода, а дифференциальная обмотка имеет 7 витков.

Сердечник якоря собран из отдельных листов электротехнической стали, причем в середине сердечника имеется 25 латунных листов толщиной 0,5 мм. Обмотка якоря — простая волновая. В пазах обмотка удерживается гетинаксовыми клиньями, а лобовые части — проволочными бандажами. В каждом из четырех щеткодержателей, помещено по одной щетке марки ЭГ 14 с силой нажатия 9,8–10,8 Н.

Вспомогательный генератор МВТ 25/11 (рис. 8.4) содержит шесть главных и шесть добавочных полюсов. Лобовые части обмоток удерживаются проволочными бандажами. Снабжен четырмя щеткодержателями. Щетки — марки ЭГ 14.

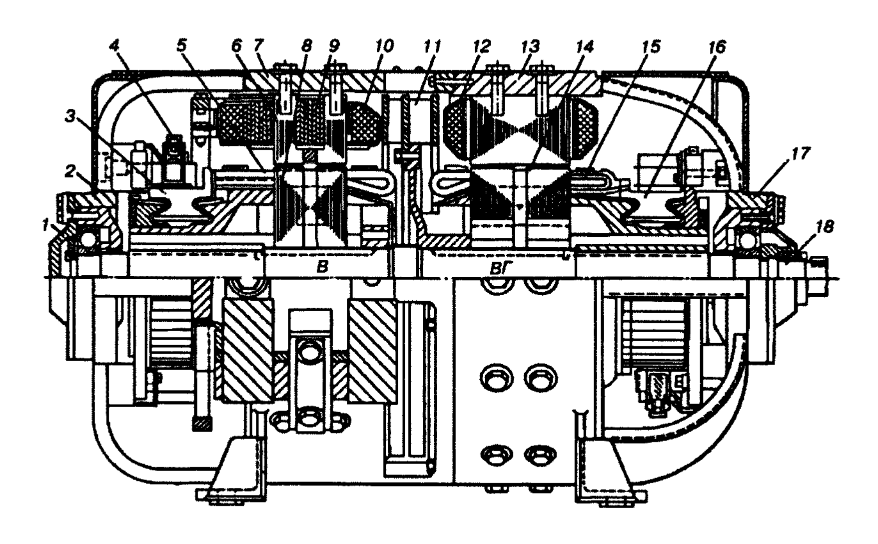


Рис. 8.4. Двухмашинный агрегат с возбудителем типа МВТ 25/9 и вспомогательным генератором типа МВТ 25/11:

1 — шарикоподшипник; 2, 17 — подшипниковые щиты; 3, 16 — коллекторы; 4 — щеткодержатель; 5, 15 — обмотка якоря; 6 — сердечник полюса; 7, 13 — станины возбудителя и генератора; 8, 14 — якоря; 9 — дифференциальная обмотка; 10 — независимая обмотка; 11 — вентилятор; 12 — главный полюс; 18 — вал

8.3. *Стартер — генератор* ПСГ

Стартер — генератор предназначен для работы в двух режимах: стартерном (при пуске дизеля) в качестве электродвигателя последовательного возбуждения с питанием от аккумуляторной батареи; в генераторном в качестве вспомогательного генератора с независимым возбуждением. Он питает электрические цепи управления, освещения и заряда аккумуляторной батареи, а также электродвигателей постоянного тока собственных нужд.

Остов стартер — генератора (рис. 8.5) цилиндрической формы содержит четыре главных и четыре добавочных полюса. На каждом главном полюсе размещены по две обмотки возбуждения: последовательная и параллельная. Последовательная (пусковая) используется в двигательном кратковременном режиме при пуске дизеля с питанием от аккумуляторной батареи, а независимая — в генераторном продолжительном режиме рабо-

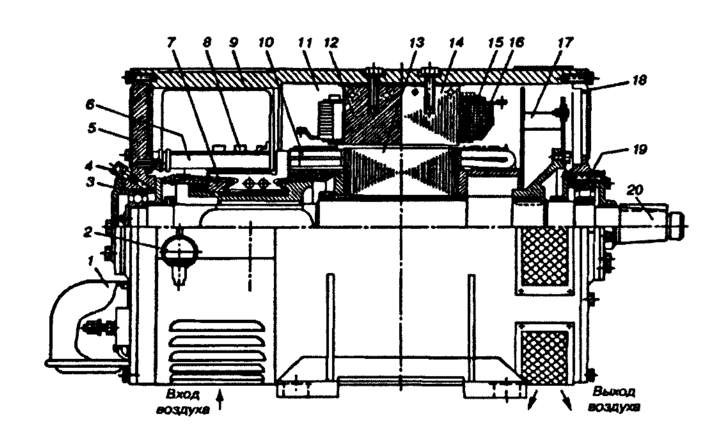


Рис. 8.5. Стартер-генератор типа ПСГ:

1 — коробка выводов; 2 — замок крышки; 3, 19 — подшипники; 4 — масленка; 5, 18 — подшипниковые щиты; 6 — кронштейн (бракет); 7 — коллектор; 8 — щеткодержатель; 9 — корпус; 10, 13 — обмотка и сердечник якоря; 11, 12 — катушка и сердечник добавочного полюса; 14 — сердечник главного полюса; 15 — катушка пусковая; 16 — катушка независимого возбуждения; 17 — вентилятор; 20 — вал

ты в качестве вспомогательного генератора. К торцевым сторонам станины прикреплены передний и задний подшипниковые щиты.

Якорь установлен в двух подшипниках: шариковым 76-313 со стороны коллектора и роликовом 3261 К1М со стороны привода.

Вал стартер — генератора приводится во вращение от раздаточного редуктора дизеля. На тепловозе он устанавливается на корпусе тягового генератора или на раме тепловоза.

8.4. Электродвигатель 2П2К привода компрессора тепловоза

На большинстве эксплуатируемых тепловозах компрессор получает вращение от дизеля, но на некоторых тепловозах, например, 2ТЭ 116 приводом компрессора является электродвигатель 2П2К, который получает питание от стартер — генератора номинальным напряжением 110 В. Возбуждение — смешанное. Обмотки возбуждения расположены на четырех главных полюсах. Электродвигатель имеет высокую частоту вращения по сравнению с требуемой для компрессора, поэтому вал электродвигателя и вал компрессора соединены через одноступенчатый понижающий редуктор. Благодаря этому достигается увеличение маховой массы приводного электродвигателя и уменьшение пульсации тока якоря стартер — генератора.

8.5. Вспомогательные машины электровозов постоянного тока

8.5.1. Электродвигатели привода компрессоров

Это машины постоянного тока последовательного возбуждения. Для уменьшения габаритов двигателя последние часто делаютют быстроходными. В этом случае вращающий момент от двигателя к компрессору, как и на некоторых тепловозах, передают через редуктор (зубчатую передачу), снижающий частоту вращения вала двигателя. При применении тихоходного двигателя, валы двигателя и компрессора соединяют с помощью муфты.

На электровозах ВЛ10 для привода компрессора КТ-6эл применяют электродвигатели НБ-431А с независимой вентиляцией. Номинальная частота вращения двигателя 470 об/мин, поэтому он соединен с компрессором муфтой.

Цилиндрический остов (рис. 8.6) с помощью лап *13* опирается на фундаментную плиту. Четыре главных и четыре добавочных полюса прикреплены к внутренней части остова. Сердечники *15* главных полюсов изготовлены из отдельных пластин электротехнической стали, стянутых заклепками. В пакетах листов главных полюсов сделаны резьбовые отверстия, куда ввернуты шпильки *16*, с помощью которых крепится сердечник к остову. Сердечники *4* добавочных полюсов выполнены сплошными и прикреплены к остову болтами *5*.

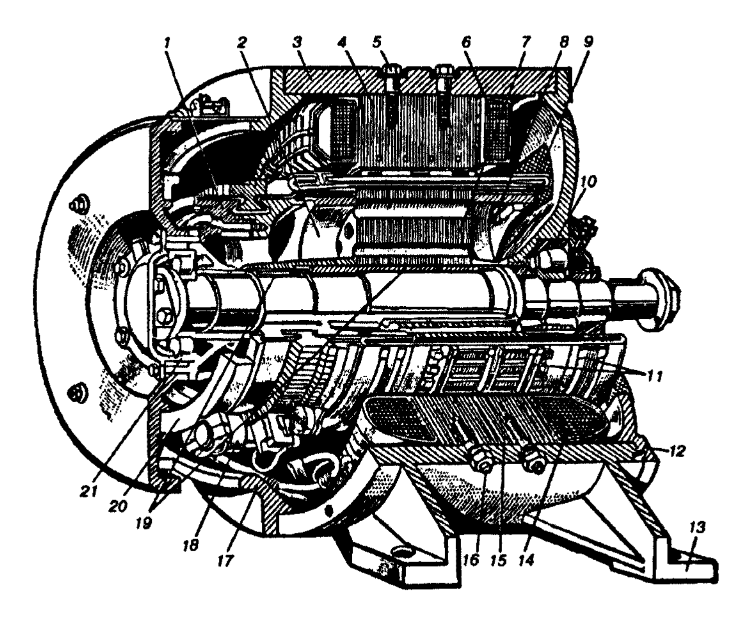


Рис.8.6. Электродвигатель НБ-431А:

1 —коллектор; 2 — передняя шайба; 3 — остов; 4 — добавочный полюс; 5 — болт; 6 — обмотка возбуждения добавочных полюсов; 7 — якорь; 8 —задняя нажимная шайба; 9 — сетка; 10, 21 — подшипники; 11 — бандажи; 12, 17 — подшипниковые щиты; 13 — лапы; 14 — обмотка возбуждения главных полюсов; 15 — сердечник главных полюсов; 16 — шпилька; 18 — щеткодержатель

Катушки главных *14* и добавочных *6* плюсов намотаны медным проводом диаметром 1,81 мм. Корпусная изоляция катушек состоит из шести слоев лакоткани, а покровная изоляция — из одного слоя киперной ленты, уложенных в полуперекрышу.

Подшипниковые щиты *12* и *17* прикреплены к остову болтами. Через брезентовый патрубок и квадратное отверстие, расположенное в нижней части подшипникового щита *17*, со стороны коллектора проходит охлаждающий воздух. В подшипниковом щите *12* имеются отверстия, закрываемые сеткой и предназначенные для выхода воздуха. Вал якоря опирается на роликовые подшипники *10* и *21* разного размера, запрессованные в подшипниковые щиты. На вал напрессованы: передняя нажимная шайба *8* и коллектор *1*. Медные коллекторные пластины изолированы друг от друга прокладками из миканита. От корпуса и нажимного конуса коллектора пластины изолированы миканитовой манжетой. Сердечник якоря имеет аксиальные каналы для прохода охлаждающего воздуха.

Обмотка якоря — простая волновая. Корпусная изоляция катушек состоит из девяти слоев лакоткани, а покровная — из одного слоя тафтяной ленты. Лобовые части обмотки якоря закреплены бондажами *11*. На поворотной траверсе *20* с помощью стальных пальцев укреплены щеткодержатели, которые опрессованы пресс — массой АГ-4. Сверху пресс — массы на пальцы надеты фарфоровые изоляторы.

Обмотки якоря, главных и добавочных полюсов двигателя соединены последовательно. Наружу из машины выведены два выводных кабеля, которые маркируют буквами Я и КК.

8.5.2. Мотор-вентиляторы

Приводом центробежного вентилятора электровоза ВЛ 11 и генератора управления НБ-110 (или ДК-105) служит электродвигатель ТЛ 110-М. Электродвигатель установлен в машинном отделении каждой секции перпендикулярно продольной оси электровоза.

Остов электродвигателя (рис. 8.7.) цилиндрической формы, отлит из стали 25Л-1. К внутренней стороне остова прикреплены четыре главных и четыре добавочных полюса. Главные полюсы расположены по вертикальной и горизонтальной осям, а

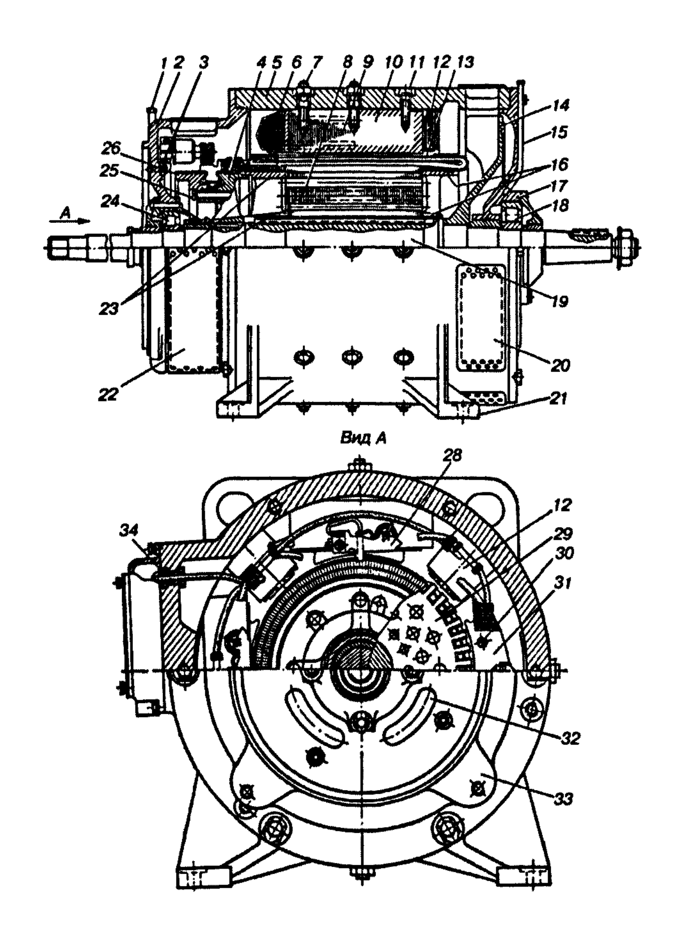


Рис. 8.7. Электродвигатель ТЛ-110:

1, 15 — маслопровод; 2, 17 — подшипниковые щиты; 3 — поворотная траверса; 4 — коллектор; 5 — остов; 6 — катушки главных полюсов; 7 — шпильки; 8 — якорь; 9 — сердечник главных полюсов; 10 — сердечник добавочного полюса; 11, 25 — болты; 12 — обмотка возбуждения добавочного полюса; 13 — обмотка якоря; 14 — вентилятор; 16, 23 — нажимные шайбы; 18, 24 — подшипник; 19 — вал; 20 — крышка; 21 — лапы; 22 — крышка коллекторного люка; 26 — нажимной конус; 27 — прилив для транспортировки; 28 — щеткодержатель; 29 — лист якоря; 30 — заклепка; 31 — сердечник главного полюса; 32 — отверстие; 33 — прилив; 34 — резиновые втулки

добавочные полюсы расположены по диагональным осям. Сердечники *9* главных полюсов собраны из тонколистовой стали СТ-2 толщиной 1,5 мм и стянуты стальными шпильками. Сердечники *10* добавочных полюсов изготовлены из толстолистового стального проката с латунными угольниками, прикрепленными к полюсным наконечникам. Между сердечником полюса и остовом установлены диамагнитные прокладки толщиной 3 мм.

Обмотка возбуждения *6* главного полюса изготовлена из прямоугольного провода ПСД размером 2,24×3,75 мм и содержит 120 витков. Корпусная изоляция обмоток главных и добавочных полюсов выполнена из стеклослюдинитовой ленты ЛС40Ру-ТТ в шесть слоев с перекрытием в половину ширины ленты (вполуперекрышу). Затем полюсы в сборе (главные и добавочные) пропитывают в эпоксидном компаунде ЭМТ-1 или ЭМТ-2.

Щеточный аппарат состоит из поворотной траверсы *3*, в которой закреплены четыре изоляционных пальца. Палец представляет собой стальной стержень, спрессованный пресс — массой АГ-4В, сверху которой насажен фарфоровый изолятор. На пальцах закреплены четыре щеткодержателя, которые можно регулировать в радиальном направлении. В каждом щеткодержателе установлено по одной щетке ЭГ-61.

Якорь электродвигателя состоит из коллектора, сердечника *8*, выполненного из отдельных листов электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм и имеющего три ряда аксиальных отверстий для прохода охлаждающего воздуха, волновой обмотки *13*, якоря, уложенной в пазы сердечника, передней *13* и задней *16* нажимных шайб, вентилятора *14* и вала *19*. Сердечник якоря с нажимными шайбами и коллектор напрессованы на вал. Медные пластины коллектора изолированы друг от друга миканитовыми прокладками, а от корпуса миканитовыми манжетами и цилиндром.

Корпусная изоляция катушек якоря состоит из шести слоев стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5-СПл и одного слоя стеклоленты толщиной 0,11 мм, одного слоя ленты фторопласта толщиной 0,03 мм и одного слоя стеклоленты толщиной 0,1 мм, уложенных в полуперекрышу. Лобовые части обмотки якоря закреплены стеклобандажной лентой толщиной 0,18 мм.

Якорь опирается на роликовые подшипники, установленные в подшипниковых щитах. Подшипниковые щиты прикреплены к

остову шестью болтами с пружинными шайбами. Подшипниковый щит со стороны коллектора имеет специальные приливы для крепления остова генератора управления НБ-110 или ДК-405К.

8.5.3 Генераторы управления ДК-405К и НБ-110

Генераторы ДК-405К были установлены на первых электровозах серии ВЛ11, а на последующих электровозах ВЛ11 были установлены генераторы НБ-110.

Они предназначены для питания цепей управления, освещения и обмоток независимого возбуждения преобразователей.

Генератор ДК-405К представляет собой четырехполюсную машину без дополнительных полюсов. Он состоит из остова *10* (рис. 8.8), якоря и щеточного аппарата. Генератор своих подшипниковых щитов не имеет.

Остов генератора с торцевой стороны закреплен на подшипниковом щите электродвигателя ТЛ-110М, установленном со стороны коллектора. Остов отлит из стали 25Л-1 и имеет цилиндрическую форму. Сердечник *7* главного полюса набран из тонколистовой стали Ст2 толщиной 1,5 мм и скреплен стальными заклепками. Сердечник полюса крепится к остову двумя болтами *8*.

Катушка *11* главного полюса намотана проводом ПСД и имеет 510 витков.

Якорь генератора насажен консольно на цилиндрическую часть вала электродвигателя ТЛ-110М и состоит из сердечника *13* с волновой обмоткой, коллектора *4*, передней нажимной шайбы *6*, напрессованной на втулку *3*. Сердечник якоря набран из электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм.

Щеточный аппарат генератора состоит из траверсы поворотного типа, на которой укреплены четыре изоляционных пальца со щеткодержателями.

В отличие от генератора ДК-405К генератор НБ-110, кроме четырех главных полюсов, имеет четыре добавочных полюса, изготовленных из толстолистовой стали Ст2. Катушка

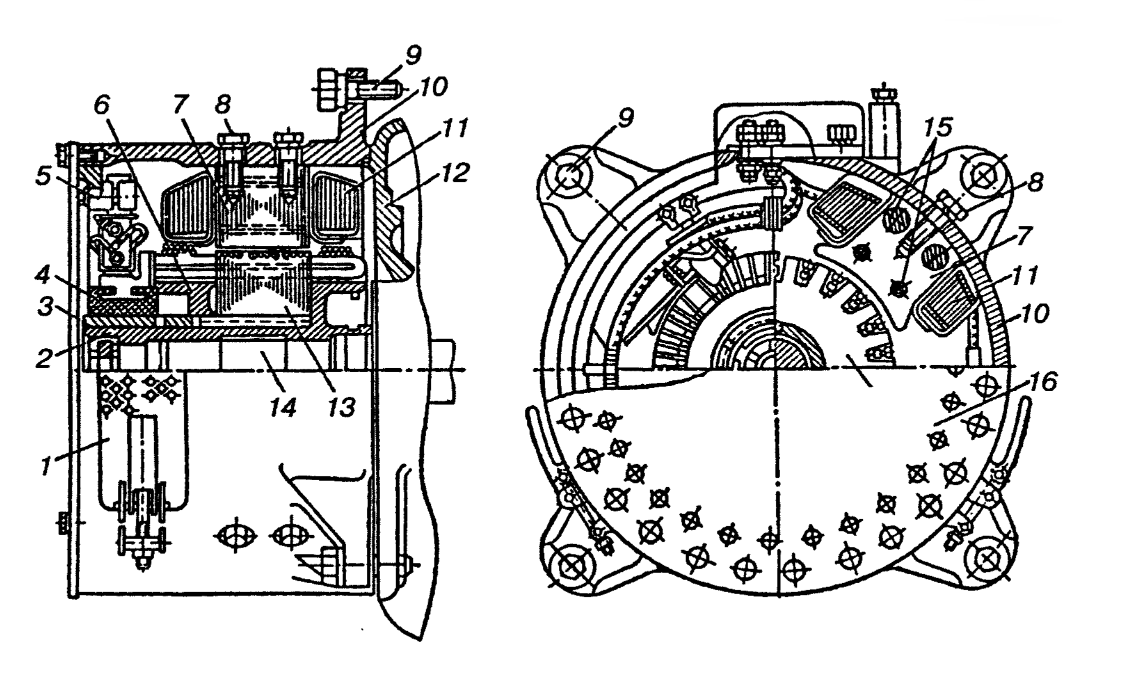


Рис. 8.8. Генератор управления ДК-405К:

1 — крышка; 2, 3 — втулки; 4 — коллектор; 5 — поворотная траверса; 6 — передняя нажимная шайба; 7 — сердечник главного полюса; 8, 9 — болты; 10 — остов; 11 — катушки главных полюсов; 12 — подшипниковый щит; 13 — якорь; 14 — вал; 15 — заклепки; 16 — торцевая крышка

добавочного полюса изготовлена из прямоугольного провода ПММ размером 2,5х13,2 мм и имеет 18 витков. Корпусная изоляция выполнена из стеклослюдинитовой ленты. Катушки как главных так и добавочных полюсов совместно с сердечниками представляют собой неразъемные моноблоки. В остальном конструкция генератора НБ-110 идентична с генератором ДК-405К.

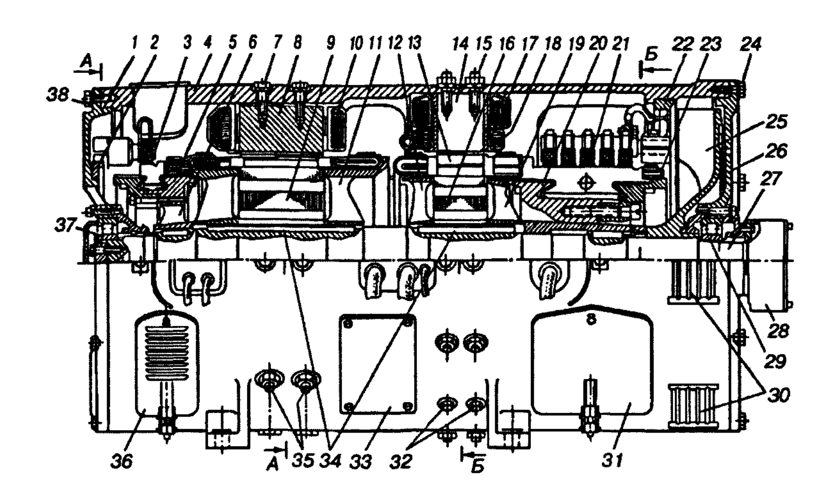
8.5.4. Преобразователь НБ-429А

Преобразователь НБ-429А предназначен для питания обмоток возбуждения тяговых двигателей в режиме рекуперации. Преобразователь (рис. 8.9) состоит из генератора и приводного двигателя, получающего питание от контактной сети.

Генератор преобразователя НБ-429А имеет на главных полюсах катушки независимого возбуждения и катушки противовозбуждения, по которым в режиме рекуперации проходит ток тяговых двигателей. МДС этих катушек направлены встречно, что ограничивает броски тока рекуперации двигателей при резких изменениях напряжения в контактной сети. Двигатели преобразователей имеют смешанное возбуждение: последовательное и

Продолжение рис. 8.9.

шайбы; 13 — обмотка якоря; 14 — сердечник главного полюса; 15 — шпилька; 16 — сердечник якоря; 17 — катушка независимого возбуждения; 18 — катушка последовательного возбуждения; 20 — коллектор; 21 — щеткодержатель; 22 — поворотная траверса; 23 — уравнители; 25 — вентилятор; 26 — подшипниковый щит; 27 — вал; 28 — реле оборотов; 29 — подшипник; 30 — решетка; 31 — крышка люка; 33 — крышка; 34 — шпонка; 35 — шпилька; 36 — крышка люка; 37 — под-шипник; 39 — сердечник главного полюса; 40 — катушка независимого возбуждения; 41 — катушка последовательного возбуждения; 42, 43 — стальные листы якорей; 44 — сердечник добавочного полюса; 45 — катушка добавочного полюса; 46, 47 — изолирующие пальцы



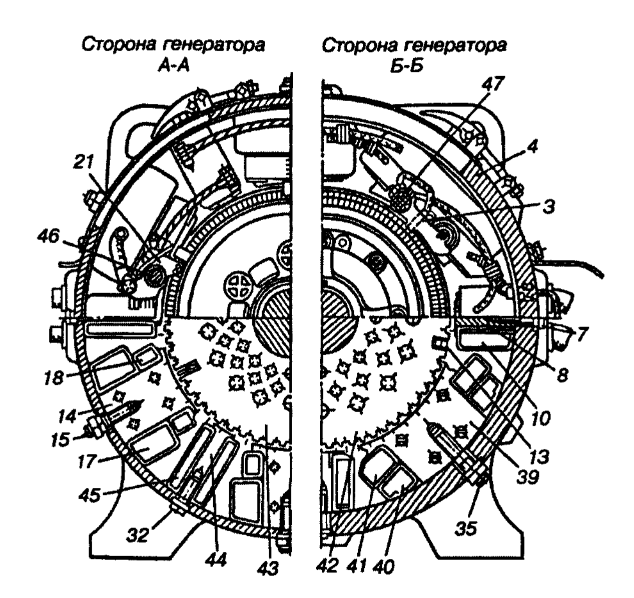


Рис. 8.9. Пребразователь НБ- 429А:

1 — подшипниковый щит; 2 — поворотная траверса; 3 — щеткодержатель; 4 — остов; 5 — коллектор; 6 — нажимная шайба; 7, 24, 32, 38 — болты; 8 — сердечник добавочного полюса; 9 — сердечник якоря; 10 — катушка добавочных полюсов; 11, 12, 19 — нажимные

независимое. Последовательное возбуждение позволяет ограничить частоту вращения преобразователей в допускаемых пределах при включении без нагрузки на генераторах. Обмотки независимого возбуждения двигателя питаются от генератора управления. Обмотки независимого возбуждения первого и второго генераторов соединены последовательно и питаются также от генератора управления, но через регистр, сопротивление которого регулирует машинист тормозной рукояткой контролера.

Катушки последовательного возбуждения *41* главных полюсов *14* электродвигателя имеют по 95 витков. Они изготовлены из провода прямоугольного сечения ПСД размером 1,6×3,0 мм, а катушки независимого возбуждения имеют по 234 витка и изготовлены из прямоугольного провода ПСД размером 1,6×2,36 мм. Катушки добавочных полюсов *10* имеют по 219 витков и изготовлены из прямоугольного провода ПСД размером 1,6×3,0 мм. Корпусная изоляция катушек последовательного возбуждения главных полюсов и катушек добавочных полюсов состоит из шести слоев, а катушек независимого возбуждения — из трех слоев стеклослюдинитовой ленты ЛС40Р-ТТ размером 0,13×25 мм, уложенной в полуперекрышу. Катушки совместно с сердечниками полюсов пропитаны эпоксидным компаундом ЭМТ-1.

Сердечник *16* якоря электродвигателя набран из отдельных листов электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм. Он имеет три ряда аксиальных каналов для прохода охлаждающего воздуха. В пазы сердечника уложена волновая обмотка якоря *13*, изготовленная из круглого провода диаметром 1,18 мм. Корпусная изоляция катушек якоря состоит из шести слоев стеклослюдинитовой ленты толщиной 0,11 мм, уложенной с перекрытием в 1/4 ширины ленты, и одного слоя стеклоленты толщиной 0,1 мм, уложенной встык.

На главных полюсах генератора преобразователя размещены катушки независимого возбуждения *17*, изготовленные из провода ПСД размером 1,6×4,0 мм. Корпусная изоляция выполнена из стеклослюдинитовой ленты ЛС40Ру-ТТ, намотанной в три слоя вполуперекрышу. Катушки последовательного возбуждения *18* имеют по одному витку и изготовлены из прямоугольного медного провода размером 3,8×22 мм. Намотку

выполняют в два параллельных провода. Корпусная изоляция состоит из шести слоев стеклослюдинитовой ленты уложенной в полуперекрышу.

Катушки *45* добавочных полюсов генератора имеют по восемь витков медного провода МГМ размером 3,55x16 мм. Намотка выполнена в три параллельных провода. Корпусная изоляция — стеклослюдинитовая лента, уложенная в три слоя в полуперекрышу.

Сердечник *16* якоря генератора собран из отдельных листов электротехнической стали 1312 толщиной 0,5 мм. В сердечнике сделано три ряда аксиальных отверстий для прохода воздуха. В пазы сердечника уложена петлевая обмотка *13* якоря с уравнительными соединениями. Она состоит из *57* катушек, каждая из которых имеет восемь отдельных проводников, расположенных по высоте в два ряда и по четыре проводника в ряду. Изоляция катушек выполнена из стеклослюдинитовой ленты ЛСЭК-5-СПл толщиной 0,11 мм, уложенной в два слоя в полуперекрышу, одного слоя ленты из фторопласта толщиной 0,03 мм, уложенной в 1/4 ширины ленты, и одного слоя стеклоленты уложенной встык. Уравнители выполнены из провода ПСДК размером 1,6×6,6 мм и изолированы одним слоем стеклоленты толщиной 0,1 мм, уложенной в полуперекрышу.

Щеточный аппарат *3* двигателя унифицирован со щеточным аппаратом электродвигателя ТЛ-110М.

Щеточный аппарат *21* генератора состоит из траверсы 22 поворотного типа, на которой закреплены шесть пальцев, стержни которых изолированы бакелизированной бумагой. На каждом пальце закреплено пять щеткодержателей, в которых установлено по одной щетке ЭГ-2а. Траверсу к остову крепят болтами.

Коллектор *5* якоря двигателя унифицирован с коллектором двигателя ТЛ-110М (кроме размеров шпица). Коллектор *20* якоря генератора набран из медных пластин, изолированных друг от друга миканитовыми прокладками и цилиндром.

Преобразователь — самовентилирующаяся машина. Вентилятор *25* машины насажен со стороны коллектора генератора на вал. Со стороны генератора на наружной стороне подшипникового щита установлено реле оборотов *28*.

8.6. Вспомогательные машины электропоездов постоянного тока

8.6.1. Делитель напряжения (динамотор) ДК-604В

Вспомогательные машины электропоездов находятся под кузовом, а это более стесненные условия, чем внутри кузовов локомотивов. Поэтому электродвигатель привода компрессора с изоляцией на 3000 В будет иметь большие габариты и его трудно расположить под кузовом. Вследствии этого электродвигатели привода компрессоров выполняют на напряжение 1500 В. Для получения такого напряжения применяют делители напряжения (динамоторы).

Если два двигателя, имеющие одинаковые параметры, соединить последовательно и подключить к сети, падение напряжения на каждом двигателе будет одинаковым (рис. 8.10). К точке *B*, имеющий потенциал 1500 В, подключают двигатель компрессора. Если двигатель подключить к точке А и В, то хотя падение напряжения на двигателе 1500 В, но потенциал точки А составляет 3000 В, поэтому все равно изоляцию двигателя компрессора пришлось бы выполнять на 3000 В.

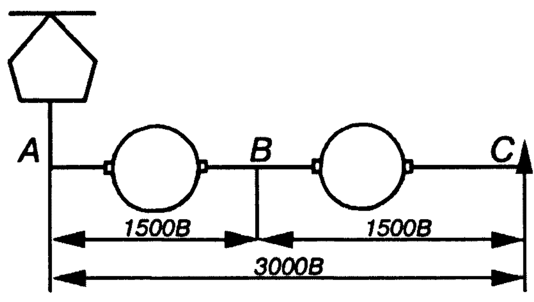


Рис. 8.10. Схема динамотора

Для уменьшения габаритов и экономии материалов оба двигателя объединили в одном корпусе (рис. 8.11).

Остов делителя стальной литой и с обеих сторон закрыт подшипниковыми щитами *1*. Якорь — один, но с каждой торцевой стороны имеет по коллектору. Якорных обмоток — две, и каждая из них присоединяется к своему коллектору. Главные полюсы — общие. На каждом главном полюсе имеются по две обмотки: неза-

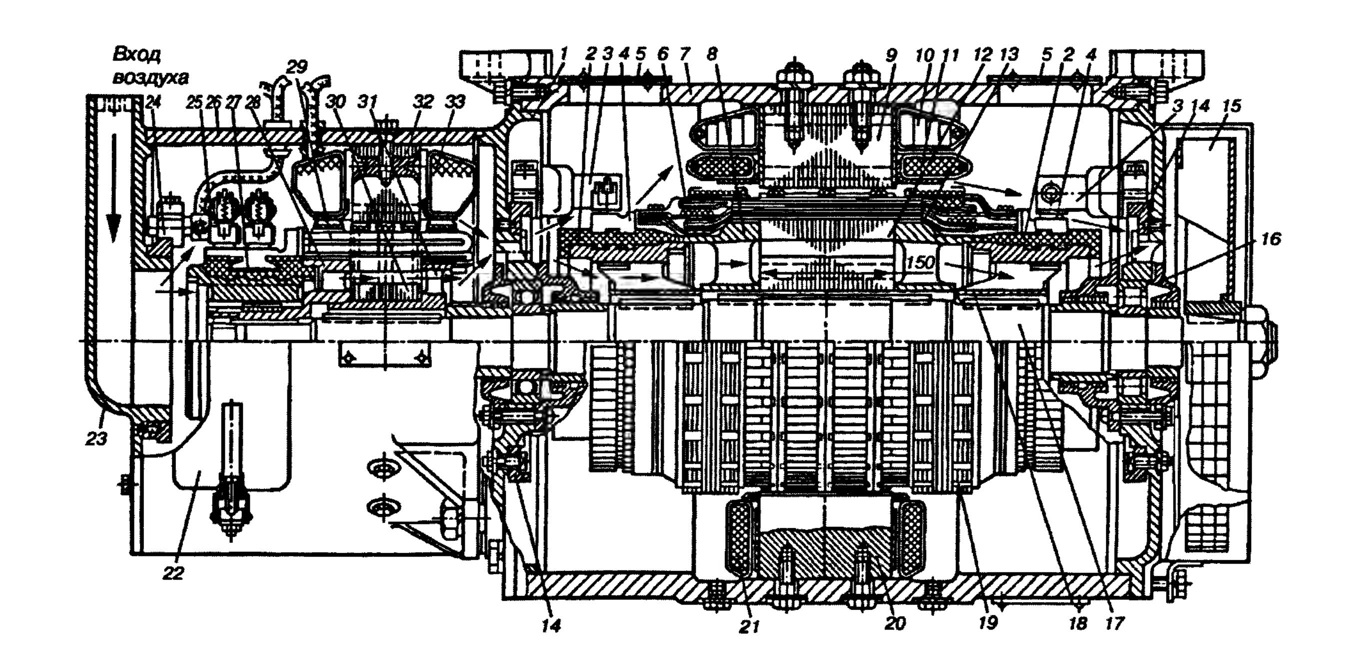


Рис. 8.11. Продольный разрез динамотора ДК-604В:

1 — подшипниковый щит; 2 — коллектор; 3 — щеткодержатель двигателя; 4 — коллекторная пластина; 5 — коллекторный люк, 6 — верхняя обмотка якоря; 7 — остов; 8 — нажимная шайба; 9 — сердечник главного полюса; 10 — катушка независимого возбуждеиия; 11 — катушка высокого напряжения; 12 — сердечник якоря; 13 — нижняя обмотка якоря; 14 — траверса; 15 — вентилятор; 16 — крышка подшипника; 17 — вал якоря; 18 — втулка коллектора; 19 — продольный бандаж;

висимого возбуждения *10* и высоковольтная *11*. Коллекторные пластины изолированы друг от друга миканитовыми прокладками. От втулки и нажимной шайбы коллекторные пластины изолированы пластмассой.

Для изоляции якорных обмоток применяют электрокартон, стеклоэскапоновую и тафтяную ленты. В пазах якоря обмотки удерживаются проволочными бандажами *19*.

Машина содержит четыре главных и четыре добавочных полюса *20*.

Четыре щеткодержателя *3* закреплены на поворотной траверсе *14*. Щетки — электрографитные, марки ЭГ-2А.

С одного конца вала напрессовано вентиляторное колесо *15*, охлаждающее машину при работе. Другой конец вала выполнен удлиненным. На нем смонтирован якорь генератора управления.

8.6.2. Генератор управления

Генератор управления (рис. 8.11) выполняет те же функции на электропоезде, что и аналогичная машина на электровозе.

Остов генератора крепят болтами к подшипниковому щиту динамотора. Передняя торцевая сторона закрыта чугунным щитом с патрубком для вентиляции. В остове расположены четыре главных полюса. Дополнительиые полюса отсутствуют. Сердечники полюсов набирают из отдельных листов электротехнической стали. Якорная обмотка *29* закреплена проволочными бандажами. Медные коллекторные пластины собраны на пластмассовом корпусе, армированном стальной втулкой. Четыре щеткодержателя установлены на поворотной траверсе. В каждом щеткодержателе помещено по две щетки.

Продолжение рис. 8.11.

20 — сердечник дополнительного полюса; 21 — катушка дополнительного полюса; 22 — коллекторный люк генератора; 23 — вентиляционный патрубок; 24 — траверса генератора; 25 — щеткодержатель генератора; 26 — остов генератора; 27 — коллекторная пластина генератора; 28 — передняя нажимная шайба; 29 — обмотка якоря, 30 — сердечник якоря; 31 — задняя нажимная шайба; 32 — главный полюс генератора; 33 — катушка главного полюса

8.7. Общепромышленные электрические машины, применяемые в тяговом подвижном составе

Общепромышленные электродвигатели серий П и 2П широко примененяются в тяговом подвижном составе. Это электродвигатели привода маслопрокачивающего П41 и топливоподкачивающего П21 насосов, вентилятора кузовов и калорифера кабины машиниста П11 тепловоза, привода вспомогательного компрессора подъема токоприемника П11М электровозов и др.

Машины данной серии характеризуются общностью конструктивных решений, технологий производства, применяемых материалов.

Основная часть серии П охватывает генераторы и двигатели с номинальной мощностью 0,3–200кВт. Эта часть серии разбита на 11 габаритов (размеров). Машины каждого габарита имеют определенный диаметр якоря D_a:

Номер габарита	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D_a, мм	83	106	120	138	162	195	210	245	294	327	368

Каждый габарит включает в себя машины с двумя различными длинами сердечника якоря. Это позволяет использовать технологическую оснастку данного габарита (штампы якоря, полюсов и пр.) и различные детали (щиты, подшипниковые щиты, узлы и пр.) для изготовления машин разной мощности при одинаковой частоте вращения. Тип П41, например, обозначает машину серии П, 8-го габарита, с более коротким якорем, а П42- с более длинным якорем.

Изготавливают эти двигатели с параллельным и смешанным возбуждением.

Рассмотрим устройство электродвигателя (рис. 8.12). Корпус *17* электродвигателя изготовлен из стальной трубы. Якорь опирается на подшипники *5* и *24*, расположенные в подшипниковых щитах, которые изготовляют из алюминиевого сплава. Съемные крышки *4, 7, 22,* и *23* образуют смазочные камеры подшипников. Для осмотра и ухода за коллектором и щеточным

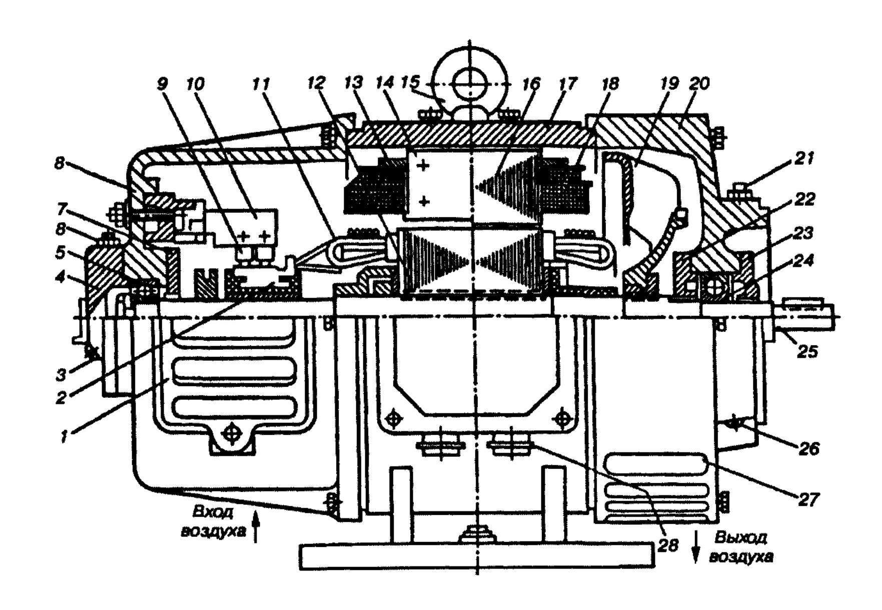


Рис. 8.12. Электродвигатель серии П:

1, 27 — крышки люков; 2 — коллектор (на пластмассе); 3, 26 — пробки для смазывания подшипников; 4, 7, 22, 23 — крышки подшипников; 5, 24 — подшипники; 6, 21 — пресс-*масленки;* 8, 20 — *подшипниковые щиты;* 9 — *щеткодержатель;* 10 — *кронштейн;* 11, 12 — обмотка и сердечник якоря; 13, 14 — катушка и сердечник добавочного полюса; 15 — *грузовой болт,* 16, 18 — *сердечник и катушка главного полюса;* 17— *корпус;* 19 — *вентилятор; 25 — вал;* 28 — *зажимы выводов*

аппаратом, а также для вентиляции двигателя в подшипниковом щите *8* имеются два люка, закрытых крышками *1* с жалюзи. Вентилятор *19* забирает наружный воздух через жалюзи в крышках *1* и выбрасывает его наружу после охлаждения двигателя через вентиляционные люки *27*, расположенные в нижней части подшипникового щита *20*.

Якорь собран на валу *25*. Обмотка *11* уложена в пазы сердечника *12*, набранного из отдельных листов электротехнической стали. Обмоткодержатели электродвигателей П11 и П21 пластмассовые, П41 — штампованные из листовой стали. Медные коллекторные пластины *2* связаны в единый моноблок при помощи пластмассового корпуса.

К подшипниковому щиту *8* крепится болтами траверса, изготовленная из алюминиевого сплава. Щеткодержатели *9* — шатунные, штампованные. Пальцы щеткодержателей изготавливают из изоляционного пресс — материала или текстолита.

Электродвигатели П11 и П21 содержат два главных *16* и один добавочный*14* полюс. У электродвигателя П41 четыре главных и четыре добавочных полюса. Сердечники главных полюсов набраны из отдельных пластин электротехнической стали и стянуты шпильками — заклепками. Катушка 18 параллельной обмотки возбуждения располагается на сердечнике ближе к якорю, а катушка обмотки последовательного возбуждения — ближе к корпусу. Катушка *13* добавочного полюса и катушки *18* крепятся на полюсах металлическими рамками. Между наконечниками полюсов и катушками установлены опорные рамки из листового стеклотекстолита. В коробке *28* находятся выводы обмоток. Выводы крепятся на зажимах, установленных на изоляционной панели. Под панелями находятся конденсаторы, предназначенные для подавления радиопомех, возникающих при работе двигателя.

Контрольные вопросы

1. **Каково назначение вспомогательных машин электровозов, тепловозов, электропоездов?**
2. **Каково назначение вспомогательного генератора МВТ25/11?**
3. **Какова роль расщепленных полюсов возбудителя?**
4. **Каково назначение генератора управления?**
5. **Какие общепромышленные машины применяются в тяговом подвижном составе?**

Раздел 2.
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Глава 9.
Классификация и конструкция машин переменного тока

9.1. Основные виды машин переменого тока

Из электрических машин переменного тока на тяговом подвижном составе преимущественно применяют трехфазные. Однофазные машины используют редко.

Действие всех машин переменного тока основано на применении вращающегося магнитного поля. Электрические машины переменного тока подразделяются на три основных вида: синхронные, асинхронные и коллекторные.

У синхронных машин частота вращения вращающегося магнитного поля и ротора одинаковы. Вращение ротора происходит в том же направлении, в котором вращается магнитное поле.

Если частота вращения вращающегося магнитного поля и ротора отличаются друг от друга, то такая машина является асинхронной. Ротор асинхронных машин вращается несинхронно относительно вращающегося магнитного поля.

Роторы коллекторных машин переменного тока также вращаются несинхронно с магнитным полем, поэтому их также можно считать асинхронными. На тяговом подвижном составе коллекторные машины переменного тока практически не применяются.

9.2. Устройство статора

Вращающееся магнитное поле замыкается по сердечнику статора, который собирается из отдельных листов электротехнической стали, обычно покрытых с обеих сторон масляно-канифольным изоляционным лаком.

Листы сердечников статоров электрических машин малой мощности иногда не покрывают лаком, так как в этом случае изоляцией является оксидная пленка на поверхности листов, которую создают искусственным путем или же она появляется естественным образом.

Сердечник статора закрепляют в корпусе. В сердечнике делают пазы, куда укладывают трехфазную обмотку, выводы которой присоединяют к сети трехфазного тока.

9.3. Обмотки статоров

Как и в машинах постоянного тока, простейшим элементом обмотки является секция, которая состоит из нескольких витков, образуя катушку. Катушку распологают в пазах. Ширина катушки y приближенно равна полюсному делению τ:

$$y = \tau .$$

Обмотки статоров подразделяют на однослойные и двухслойные. В *однослойных обмотках* катушки размещены в один слой, а в *двухслойных* — пазовая сторона катушки занимает половину паза по его высоте, а другую половину этого паза занимает пазовая сторона другой катушки. Рассмотрим принцип выполнения трехфазной однослойной обмотки.

Однослойные обмотки различают по выполнению катушек, и размещению лобовых частей. Каждая сторона катушки полностью заполняет паз сердечника. Если катушки имеют разную ширину, то катушки, составляющие катушечную группу, охватывают одна другую (рис. 9.1). Обмотки статора характеризуются следующими параметрами: числом пазов в сердечнике статора Z; числом пар полюсов p; числом фаз m; числом пазов, приходящимся на полюс и фазу q. Они связаны соотношением:

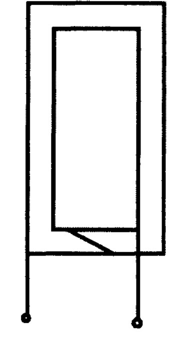


Рис. 9.1. Катушечная группа

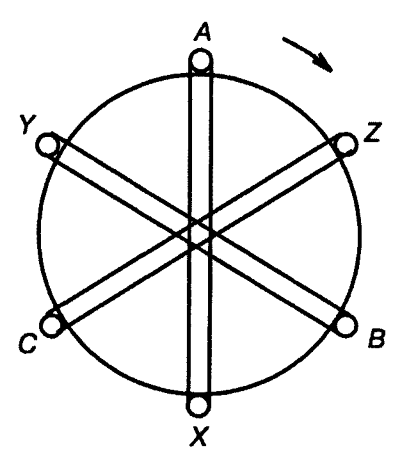


Рис. 9.2. Расположение катушек в пазах статора

$$Z=2mpq. \qquad (9.1)$$

Рассмотрим построение однослойной трехфазной обмотки со следующими исходными данными: Z = 12; p = 1; m = 3. Для удобства и лучшего понимания построения выполним несколько предварительных операций. Вначале распологаем два полюсных деления. В каждом полюсном делении находятся по три фазы *A, B, C* (рис. 9.2). За фазой *A* распологается конец фазы *C* — ее вывод *Z*, а затем фаза *B*. Таким образом получается последовательность следования фаз *A, C, B*. Во втором полюсном делении все повторяется: конец фазы *A* — вывод *X* — фаза *C*, конец фазы *B* — вывод *Y*, т.е. получаем последовательность *A-C-B* (рис. 9.3).

N			S		
A	C	B	A	C	B

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12

Рис. 9.3. Распределение пазов и сторон катушек по фазам

На каждом полюсном делении соблюдаем указаанную последовательность фаз. После этого проводим линии — проводники, расположенные в пазах статора. Для наглядности проводники, относящиеся к одинаковым фазам проводим сплошными линиями (фаза *A*) или штриховыми (фзы *B* и *C*). Затем проводники одноименных фаз соединяем в общую сеть (рис. 9.4, *а*). Лобовые части обмотки статора находятся в стесненных условиях. Во-первых, с наружной стороны лобовых частей обмоток необходимо разместить подшипниковый щит, во-вторых с внутренней стороны они не должны задевать ротор. Поэтому лобовые части обмоток распологают в двух или в трех «плоскостях» (или «ярусах»), как это показано на рис. 9.4, *б*. Трехплоскостные обмотки обычно применяют для нечетного числа пар полюсов, а двухплоскостные — для четного. Такое расположение лобовых частей позволяет избежать пересечения их катушек, принадлежащим разным фазам.

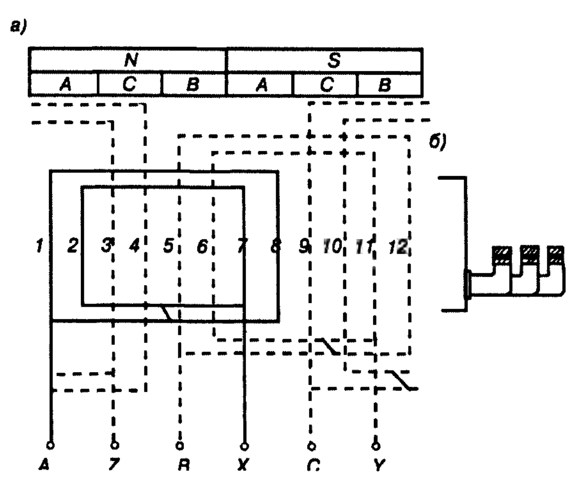


Рис. 9.4. Схема однослойной трехфазовой обмотки

Основным недостатком *концентрических обмоток* является то, что катушки имеют разные размеры. Во-первых это приводит к тому, что катушки имеют разное сопротивление, а во-вторых несколько усложняет ручное изготовление обмотки. Эти недостатки устраняются в *шаблонных однослойных обмотках* (рис. 9.5), т.к. катушки имеют одинаковые размеры и одинаковые сопротивления. Кроме того, все катушки могут изготовляться на

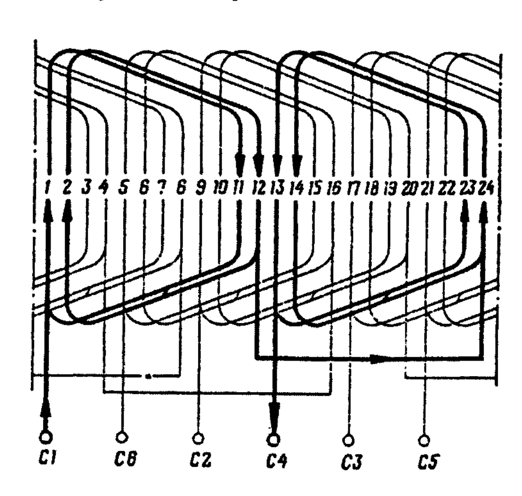


Рис. 9.5. Шаблонная обмотка вразвалку при 2р = 2; Z = 24; q = 4; у = 10/1–11; α = 1

одном и том же шаблоне. Лобовые части получаются короче, чем в концентрических обмотках, а это приводит к уменьшению расхода меди. Секции имеют форму трапеций, что облегчает укладку лобовых частей.

Все типы однослойных обмоток имеют тот недостаток, что не позволяют применять катушки с укороченным шагом, который улучшает рабочие свойства машины.

Двухслойные трехфазные обмотки бывают двух видов: *петлевые и волновые*. В электромагнитном отношении оба вида обмоток равноценны. Преимущественно используют петлевые обмотки, а волновые обычно используют в катушке с числом витков $w = 1$. Обмотки могут иметь как целое, так и дробное число пазов на полюс и фазу q.

Рассмотрим построение трехфазной двухслойной обмотки, имеющей следующие данные: $Z = 24$; $2p = 4$; $m = 3$

$$q = Z/(2pm) = 24/(4\times3) = 2 ;$$

полюсное деление τ:

$$\tau = mq = Z/(2p) = 24/4 = 6 .$$

Примем не диаметральный, а укороченный шаг обмотки $y = 5$ зубцовых делений. Следовательно относительный шаг β:

$$\beta = y/\tau = 5/6 = 0{,}833$$

Введем *понятие катушечной группы*. Катушечная группа — это ряд последовательно соединенных между собой катушек, которые лежат в соседних пазах и принадлежат к одной фазной обмотке.

Пазы обмоток распределяем по полюсам и фазам. Вначале распределяем верхние стороны катушек. Обратимся к рис. 9.4. Первой следует фаза A, ей нужно отвести пазы 1 и 2, т.к. $q = 2$, затем отводим пазы фазе C (ее конец Z), и пазы фазы B. Во втором полюсном делении повторяем, но уже другие концы фаз X, C, Y и т.д. После распределения верхних сторон катушек распределяем нижние. Так как шаг укорочен на одно зубцовое деление, то нижние стороны катушек сдвигаем влево на одно зубцовое деление (рис. 9.6). Левые части катушек располагаем в верхней части паза, а правые — в нижнем.

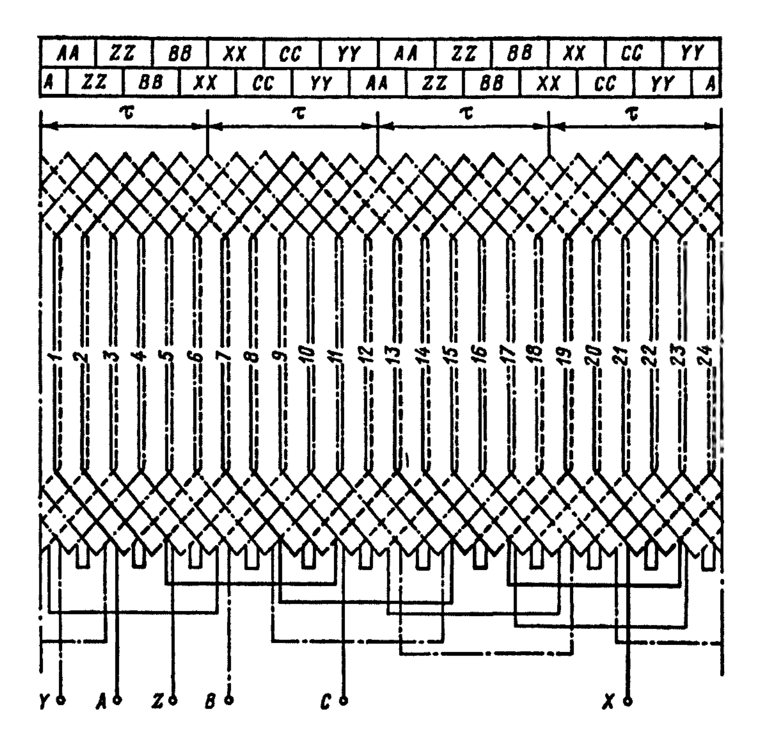


Рис. 9.6. Схема трехфазной двухслойной петлевой обмотки с $2p = 4$; $m = 3$; $Z = 24$; $q = 2$; $y = 5$; $\beta = 5/6$

Верхнюю сторону катушки *1* (паз *1*) лобовой части соединяем с нижней стороной этой же катушки (паз *6*), которую в свою очередь, присоединяем к верхней стороне катушки *2* (паз *2*). Верхнюю сторону катушки *2* соединяем с нижней стороной (паз *7*) этой же катушки. Аналогично получаем следующую катушечную группу фазы *A*, которая будет состоять из последовательно соединенных катушек. Таким образом, для фазы *A* получаем четыре группы, состоящие соответственно из катушек *1–2*, *7–8*, *13–14*, *19–20*. Их соединяют последовательно, но группы *7–8* и *19–20* повернуты по отношению к группам *1–2* и *13–14*, т.к. конец группы *1–2* соединен с концом группы *7–8* и т.д. Это сделано для того чтобы ЭДС всех групп складывались друг с другом. Таким же образом соединяют катушки других групп.

9.4. Образование вращающегося магнитного поля

На трехфазную обмотку статора, каждая фаза которой состоит из одной катушки, подаем трехфазное напряжение, при этом обмотка статора соединена «звездой», (хотя на образование вращающегося магнитного поля соединение обмоток статора «звездой» или «треугольником» влияние не оказывает). На волновой диаграмме токов (рис. 9.7, *а*) проводим вертикальные линии, соответствующие различным моментам времени и отмеченные цифрами *0*, *1*, *2*, *3*. Ниже под каждой линией изображаем обмотку статора (рис. 9.10, б). В момент времени *0* ток в фазе *A* равен нулю, в фазе *C* имеет положительное направление, а в фазе *B* — отрицательное.

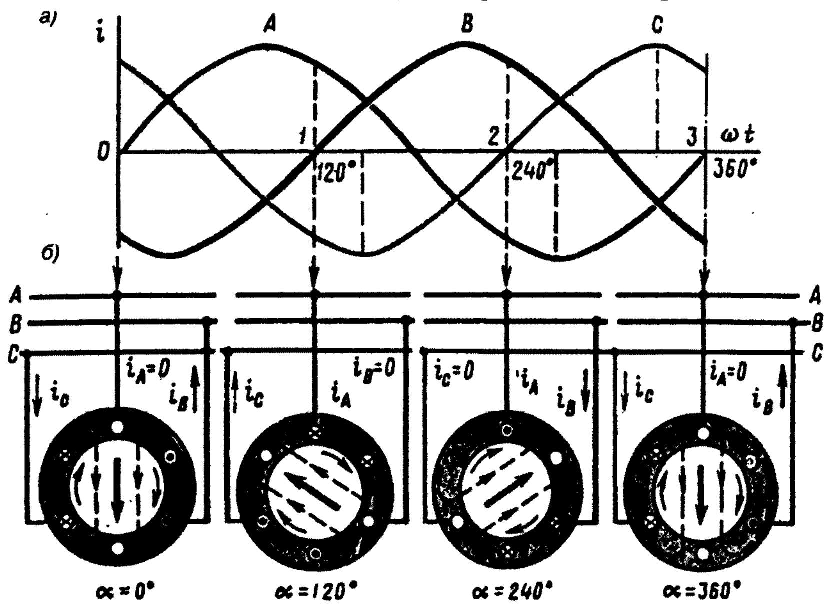


Рис. 9.7. Образование вращающегося магнитного поля

Это направление токов отмечаем в катушках статора. Соответственно, концы фаз катушек X, Y, Z будут иметь противоположное направление. Далее, по правилу буравчика определяем напрвление магнитных силовых линий вокруг катушек, а также направление МДС F_1 трехфазной обмотки статора. Как видно из рис. 9.7, *б* вектор МДС, в момент времени *0*, направлен вертикально вниз. Аналогично определяем направление МДС катушек статора в моменты времени *1*, *2*, *3*. Из построеной диаграммы видно, что вектор МДС F_1 поворачивается относительно своего положения на такой же угол в пространстве, что и мгновенные значения токов во времени, и за один период переменного тока делает полный оборот на 360^0.

В общем случае получаем, что частота вращения вектора МДС n_1 прямо пропорциональна частоте тока f_1 и обратно пропорциональна числу пар полюсов p

$$n_1 = 60 f_1 / p$$

9.5. Наведение ЭДС в обмотках статора

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в каждом проводнике витка ЭДС

$$e_{пр} = E_{mпр} \sin_{\omega} t \ ;$$

амплитуда которой

$$E = B_{\delta} l_{\delta} v = 2 f B_{\delta} l_{\delta} \tau \ ; \qquad (9.2)$$

действующее значение

$$E = E_{пр} / \sqrt{2} = 2 f B_{\delta} l_{\delta} \tau \ , \qquad (9.3)$$

где l_{δ} — расчетная активная длина машины;
$B_{\delta} = B_{m1}$ — амплитуда индукции в зазоре.

Кривая распределения магнитной индукции имеет вид трапецеидальной кривой (рис. 9.8). Ее можно разложить в гармонический ряд (рис. 9.9). Каждая гармоническая составляющая

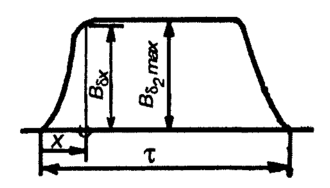


Рис. 9.8. Картина распределения магнитной индукции в воздушном зазоре электрической машины

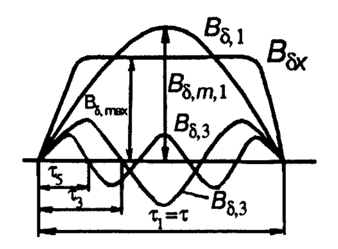


Рис. 9.9. Разложение кривой индукции магнитного поля полюса в ряд пространственных гармонических составляющих

магнитного потока будет индуктировать ЭДС в обмотке. Первая гармоника магнитного потока в воздушном зазоре

$$\Phi_{m1} = B_{\text{ср}1}\tau_1 l_\delta . \qquad (9.4)$$

Линейная скорость движения магнитного поля, относительно неподвижной катушки v

$$v = \pi D_a n/60 = \tau 2pn_1/60 = 2\tau f_1 . \qquad (9.5)$$

С учетом (9.5) мгновенное значение ЭДС проводника

$$e_{\text{пр}.1} = 2\pi/2\sqrt{2}(\Phi_{m1}f_1) = 2{,}22 f_1\Phi_{m1}. \qquad (9.6)$$

Действующее значение витка составляет

$$E_{\text{в}1} = 2E_{\text{пр}.1} = 4{,}44\, f\Phi_{m1} . \qquad (9.7)$$

Катушечная группа состоит из w_k витков, поэтому ЭДС катушечной группы определяется по формуле:

$$E_{k1} = w_k E_{\text{в}1} = 4{,}44\Phi_{m1} f_1 w_k . \qquad (9.8)$$

Эти формулы не учитывают распределение обмотки по пазам статора, укорочение или удлинение шага обмотки, а также скос пазов статора или ротора. Рассмотрим влияние этих параметров на ЭДС обмотки статора.

Если обмотка сосредоточенная, когда две и более катушек укладываются в двух пазах (рис.9.10, *а*), то ЭДС, наведенная в

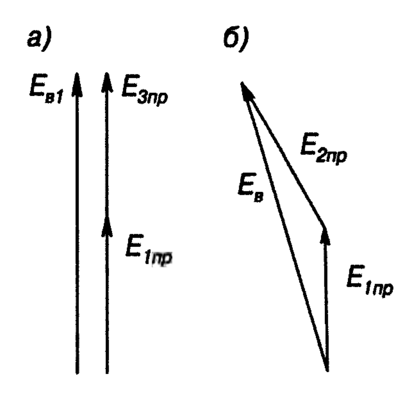


Рис. 9.10. ЭДС витка

этих катушках совпадает по фазе и равна арифметической сумме ЭДС катушек

$$E_{гс} = E_{к1} + E_{к2} . \qquad (9.9)$$

В распределенной обмотке катушки занимают более двух пазов. В этом случае ЭДС, наводимая в катушках будет сдвинута по фазе на некоторый угол и будет равна геометрической сумме ЭДС катушек, число которых равно q_1

$$E_{гр} = \sum_{1}^{q_1} E_к .$$

Из векторных диаграмм (рис. 9.10, *а, б*) видно, что ЭДС катушечной группы сосредоточенной обмотки $E_{гс}$ больше, чем ЭДС распределенной группы $E_{гр}$.

Для учета уменьшения ЭДС распределенной обмотки по сравнению с ЭДС сосредоточенной обмотки вводится *коэффициент распределения обмотки* $K_р$

$$K_р = (E_{гр}/E_{гс}) < 1 .$$

Коэффициент распределения для первой гармоники

$$K_{р1} = [\sin(0{,}5 q_1 \gamma)]/q_1 \sin(0{,}5\gamma) . \qquad (9.10)$$

где γ— угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС, т.е. ЭДС, наводимых в проводниках, расположенных в соседних пазах статора:

$$\gamma = 360p/Z . \qquad (9.11)$$

При распределении для гармоники ЭДС

$$K_{\text{р}}\nu = [\sin(0{,}5\nu q_1\gamma)]/q_1\sin(0{,}5\nu q_1\gamma)\ . \qquad (9.12)$$

При укорочении шага обмотки форма кривой результирующей ЭДС улучшается вследствие того, что происходит более резкое уменьшение высших гармоник ЭДС, индуцируемых в катушке, по сравнению с первой (основной) гармоникой ЭДС.

При укорочении на $1/\nu$ часть полюсного деления в кривой ЭДС полностью исчезает ν-я гармоника.

При выборе шага обмотки исходят из того, что нужно уничтожить полностью или значительно ослабить те высшие гармоники ЭДС, которые наиболее сильно проявлены в магнитном поле. Наиболее сильно проявляются третья, пятая и седьмая гармоники. Третью гармонику обычно уничтожают соединением трехфазной обмотки в звезду. Для ослабления пятой и седьмой гармоник шаг обмотки выбирают в пределах от $y = 4/5\ \nu_{\text{п}} = 0{,}8\tau_{\text{п}}$ до $y = 6/7\ \nu_{\text{п}} = 0{,}8\tau_{\text{п}}$. При $y = 0{,}8\tau_{\text{п}}$ коэффициент укорочения $\kappa_{y1} = 0{,}951$, $\kappa_{y5} = 0$; $\kappa_{y7} = 0{,}573$, а при шаге $y = 0{,}86\tau_{\text{п}}$, $\kappa_{y1} = 0{,}976$, $\kappa_{y5} = 0{,}433$, $\kappa_{y7} = 0$.

При увеличении числа пазов на полюс и фазу улучшается форма кривой результирующей ЭДС обмотки статора.

Уменьшение ЭДС вызванное укорочением шага витка и распределением катушек на фазной зоне, учитывается обмоточным коэффициентом

$$K_{\text{об}} = \kappa_y \kappa_{\text{р}}\ . \qquad (9.13)$$

С учетом (9.13) ЭДС фазы составляет

$$E_1 = 4{,}44\, f_1 w_1 \Phi_{m1} K_{\text{об}}\ . \qquad (9.14)$$

Пазы и зубцы на статоре и роторе приводят к перераспределению магнитного потока в воздушном зазоре. В тех местах, где зубец статора совпадает с зубцом ротора индукция увеличивается, а в тех местах, где зубец располагается под пазом, или паз под пазом, индукция уменьшается. Это приводит к тому, что кривая распределения индукции приобретает вид пилообразной кривой (рис. 9.11).

Зубцовые гармоники поля индуктируют в обмотках ЭДС. А ЭДС вызывают токи, ухудшающие характеристики машины.

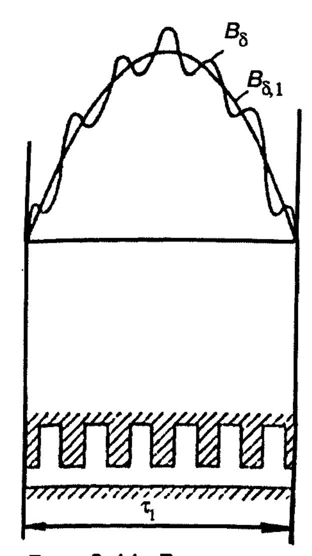


Рис. 9.11. Распределение индукции магнитного поля, созданного основной гармоникой МДС, при наличии зубчатого колеса

Мерой борьбы с зубцовыми гармониками является скос пазов или скос полюсов. Если скос выполняют на статоре, то он производится на одно зубцовое деление ротора, а если на роторе — то на одно зубцовое (пазовое) деление. При таком скосе пазов (полюсов) можно полностью уничтожить первую зубцовую гармонику e_{z1} в ЭДС.

Скос пазов также приводит к уменьшению первой гармонической составляющей ЭДС. Это учитывают коэффициентом скоса

$$\kappa_{ск.1} = [\sin(\gamma_{ск.2}/2)]/\gamma_{ск}/2, \qquad (9.15)$$

где $\kappa_{ск.1} = в_{ск}\, \pi/\tau$.

Коэффициентом скоса $\kappa_{ск1}$ учитывают в ЭДС, наряду с коэффициентом распределения и укорочения

$$E = 4{,}44 f w \Phi_m \kappa_{об} \kappa_{ск}. \qquad (9.16)$$

Контрольные вопросы

1. Какие существуют виды машии переменного тока?
2. Какие применяются виды обмоток статоров?
3. Какие необходимы условия для создания вращающегося магнитного поля?
4. От каких параметров зависит величина ЭДС катушечной группы?

Глава 10.

Синхронные машины

10.1. Применение синхронных машин в электроэнергетике и в тяговом подвижном составе

Синхронные машины довольно широко применяют в электроэнергетике. Преобладающая часть электроэнергии, используемой в экономике России и в бытовых целях, производится синхронными генераторами. На тепловых и атомных электростанциях приводом генераторов является паровая или газовая турбина, поэтому их называют турбогенераторами, а на гидроэлектростанциях — гидротурбина, из-за чего их называют гидрогенераторами.

На тепловозах с переменно-постоянной и переменно-переменной передачами в качестве тяговых используют синхронные генераторы, которые имеют ряд преимуществ по сравнению с генераторами постоянного тока.

Синхронные машины используют в качестве тяговых двигателей на ТПС нового поколения.

Их также используют в качестве вспомогательных машин, например, синхронные возбудители тепловоза 2ТЭ116, синхронные подвозбудители тепловозов 2ТЭ10Л, 2ТЭ10В, 2ТЭ10М и др. Об этом подробнее см. в гл. 13 и 14.

10.2. Устройство синхронной машины

Сердечник статора (рис. 10.1) собирается из листов электротехнической стали, которые до сборки обычно покрываются с обеих сторон масляно-канифольным изоляционным лаком. В машинах малой мощности обычно листы сердечников не имеют лакового покрытия, так как естественный или

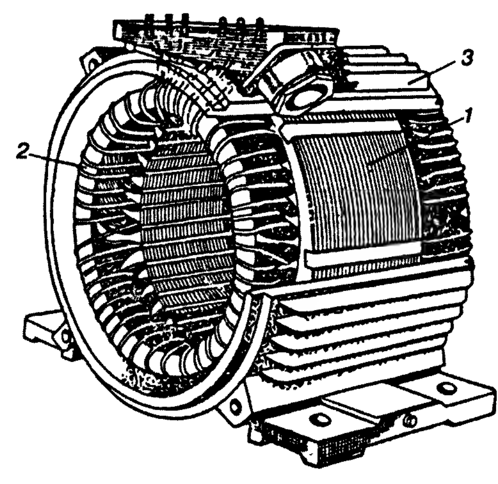


Рис. 10.1. Статор машины переменного тока:
1 — сердечник;
2 — обмотка; 3 — корпус

искусственно созданный слой оксидов на поверхности листов стали является достаточной изоляцией. Во внутренней цилиндрической поверхности сердечника сделаны пазы, в которых размещается трехфазная обмотка статора. Сердечник запрессовывают в корпус, который изготовляют из конструкционных материалов: стали, чугуна, алюминия и его сплавов (машины малой мощности) и др. Так как в обмотках статора индуцируется ЭДС, *то его сердечник с обмотками называют якорем.* С обоих торцов корпус закрыт подшипниковыми щитами, которые обычно изготовляют из того же материала, что и корпус.

Ротор синхронной машины бывает двух видов: явнополюсной (рис. 10.2, *а*) и неявнополюсной (рис. 10.2, *б*).

Сердечники полюсов **явнополюсных машин** (рис. 10.2, *а*) набирают из листов стали толщиной 1–2 мм и стягивают с помощью шпилек. В средних и крупных машинах полюса крепят к выступам вала или к ободу крестовины с помощью Т-образных хвостов. В малых машинах полюсы крепят также с помощью болтов. Обмотки возбуждения крупных машин наматывают из голой полосовой меди на ребро, и проводники обмотки изолируют друг от друга изоляционными прокладками.

В полюсных наконечниках синхронных двигателей (рис. 10.3) делают пазы, куда помещают стержни *1* пусковой обмотки из

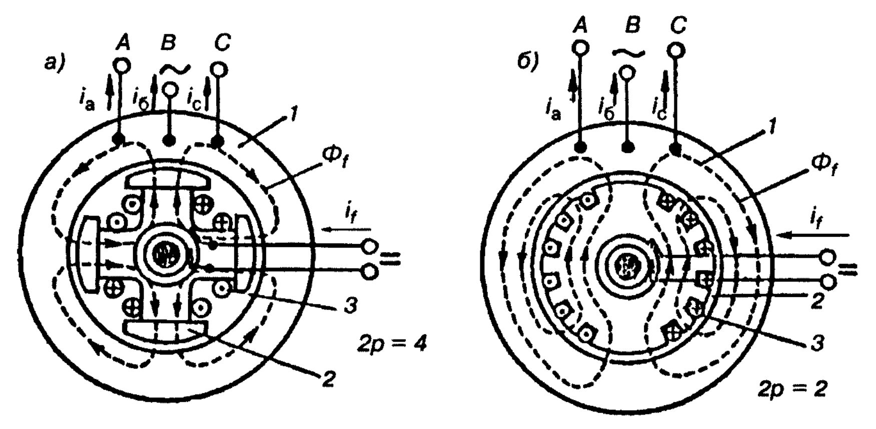


Рис. 10.2. Устройство явнополюсной (а) и неявнополюсной (б) синхронной машины:

1 — статор (якорь); 2 — ротор (индуктор); 3 — обмотка возбуждения

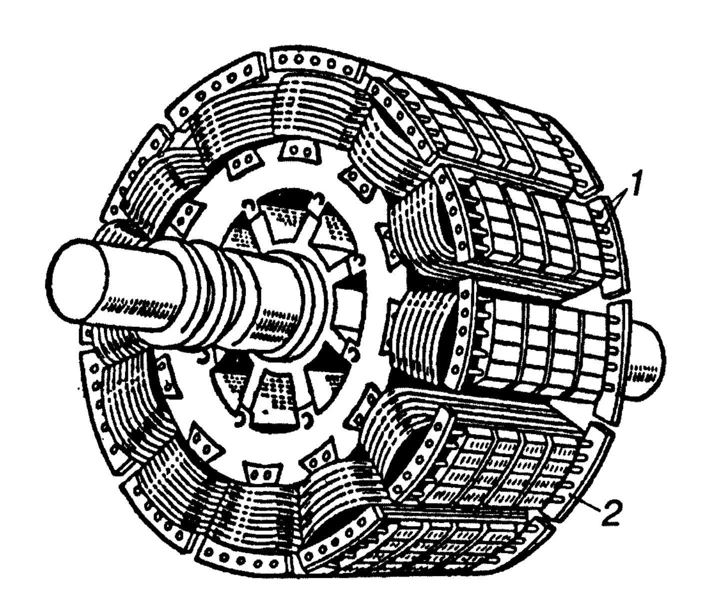


Рис. 10.3. Ротор явнополюсной синхронной машины:

1 — степржень; 2 — сегмент

материала с повышенным удельным сопротивлением (латунь и др.), которые приваривают по торцам к короткозамкнутым сегментам *2*, а последние соединяют в корткозамкнутые кольца. Такие же по конструкции обмотки, но из медных стержней изготовляют нередко в синхронных генераторах и называют в этом случае успокоительными или демпферными обмотками.

В некоторых случаях полюсы синхронных машин делают массивными из стальных поковок, и в этом случае роль пусковой обмотки выполняют сами массивные полюсы. Торцы наконечников соседних полюсов в этом случае соединяются проводниками в виде планок.

Явнополюсные синхронные машины небольшой мощности до 10–12 кВт имеют иногда так называемую обращенную конструкцию, когда индуктор (полюсы) являются неподвижными, а якорь вращается. Такие машины похожи на машины постоянного тока, у которых коллектор заменен тремя или двумя контактными кольцами для отвода тока из обмотки якоря. Подобную конструкцию имеет синхронный подвозбудитель тепловоза. Для крупных машин обращенная конструкция невыгодна, так как отвод из обмотки якоря больших токов при высоком напряжении с помощью колец и щеток чрезвычайно затруднителен и сложно осуществить надежную изоляцию вращающейся якорной обмотки высокого напряжения.

Неявнополюсные синхронные машины имеют цилиндрический ротор, выполняемый обычно из массивной стальной поковки. В роторе фрезеруют пазы для укладки обмотки возбуждения (рис. 10.2, *б*). Эти машины выпускают с числом полюсов $2p = 2$ и $2p = 4$ и имеют поэтому большие частоты вращения (при $f = 50$ Гц соответственно 3000 и 1500 об/мин).

Обмотка ротора выполняется в виде концентрических катушек и закрепляется в пазах немагнитными металлическими клиньями (дюралю-миний и т.д.), которые обладают требуемой механической прочностью. Немагнитные клинья предотвращают возникновение больших магнитных потоков рассеяния, замыкающихся вокруг пазов через клинья и вызывающих излишнее насыщение зубцов и уменьшение полезного потока, проходящего через воздушный зазор в статор.

Обмотки ротора имеют изоляцию класса B или F.

10.3. Принцип действия синхронного генератора

Ток возбуждения, протекающий по обмоткам главных полюсов ротора, создает основной магнитный поток Φ. При вращении ротора с частотой вращения n_1 его магнитный поток Φ будет пересекать проводники статора и индуцировать в них ЭДС. Так как обмотки статора расположены под углом 120^0 друг к другу, то ЭДС будет трехфазной. Частота ЭДС f_1 составляет

$$f_1 = pn_1/60. \quad (10.1)$$

Если к обмоткам статора подключить симметричную нагрузку $Z_{\text{Н}}$, то возникает симметричная система токов, которая вызовет появление вращающегося магнитного потока статора.

10.4. Способы возбуждения

Для возбуждения синхронных машин необходимо к кольцам, расположенным на роторе, подключить источник постояного тока.

Наибольшее распространение получила система электромагнитного возбуждения. В этой системе источником постоянного тока является возбудитель — генератор постоянного тока независимого или параллельного возбуждения. Возбудитель вырабатывает постоянный ток, который через щетки и контактные кольца подается на обмотки возбуждения главных полюсов, расположенные на роторе синхронной машины. Чаще всего вал синхронного генератора и вал возбудителя соединены между собой.

В крупных синхронных машинах применяют возбудители и подвозбудители (рис. 10.4, *а*).

В качестве возбудителя используют синхронный генератор, но с якорем, расположенным на роторе. Главные полюса с обмотками возбуждения — на статоре. Для их питания (обмоток возбуждения возбудителя) применяют генератор постоянного тока — подвозбудитель. Все три машины — синхронный генератор, возбудитель и подвозбудитель располагают на одном

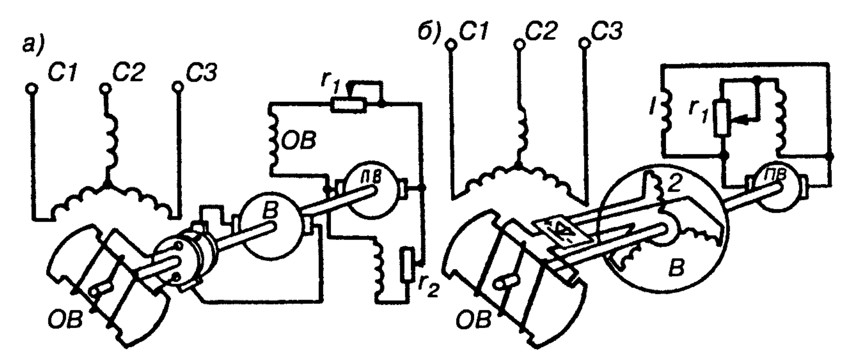


Рис. 10.4. Контактная (а) и бесконтактная (б) системы электромагнитного возбуждения синхронных генераторов

валу. Ток от якоря возбудителя через выпрямитель, щетки и контактные кольца поступает на обмотки возбуждения синхронного генератора.

В настоящее время широкое распространение получила система бесконтактного возбуждения, при которой выпрямитель закреплен на валу синхронного генератора и вращается вместе с ним. В этом случае не требуется контактных колец и щеток (рис. 10.4, *б*). В этой системе в качестве возбудителя также применен синхронный генератор, с таким же расположением обмоток, как в предыдущем случае.

Отсутствие скользящих контактов в цепи возбуждения синхронной машины позволяет повысить ее надежность и увеличить КПД.

Кроме электромагнитного возбуждения, в синхронных машинах иногда применяют магнитоэлектрическое возбуждение, к примеру, когда магнитный поток создается постоянными магнитами. Магнитоэлектрические машины имеют повышенный КПД и являются бесконтактными. Однако при больших мощностях они оказываются тяжелее машин с электромагнитным возбуждением. Ко всему прочему, их недостатком является сложность регулирования напряжения.

Разновидностью синхронных машин являются гистерезисные машины, которые применяют в качестве двигателей небольшой мощности. При пуске в ход они работают как асинхронные двигатели, а в установившемся режиме — как синхронные

магнитоэлектрические. Ротор гистерезисной машины, в отличие от магнитоэлектрических машин, намагничивается в процессе пуска.

В синхронных генераторах, к примеру, грузоподъемных кранов на железнодорожном ходу типа КДЭ, применяется самовозбуждение (рис. 10.5). В этом случае часть мощности, необходимой для возбуждения, отбирается от обмотки стато-ра этого же генератора. Для первоначального возбуждения ток подается от аккумуляторной батареи крана.

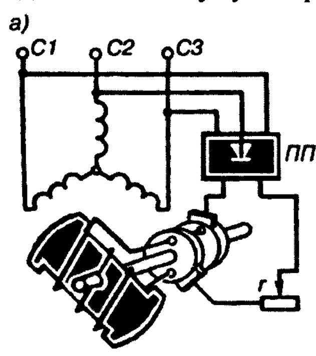


Рис. 10.5. Принцип самовозбуждения синхронных генераторов

10.5. Реакция якоря синхронной машины

При работе синхронного генератора по обмоткам возбуждения протекает ток создавая МДС возбуждения

$$F_d = I_в w \ . \qquad (10.2)$$

Когда генератор нагружен, то по его обмоткам якоря, с числом витков w_1, протекает ток I_1 создавая МДС якоря

$$F_{q1} = I_1 w_1 \ . \qquad (10.3)$$

МДС статора (якоря) воздействует на МДС ротора (индуктора) усиливая или ослабляя поле возбуждения или же искажая его форму.

Воздействие МДС обмотки якоря на МДС обмотки возбуждения называют реакцией якоря.

Нагрузка синхронного генератора, как правило, смешанная: активно-индуктивная или активно-емкостная. Рассмотрим вна-

чале воздействие каждой нагрузки в отдельности на работу синхронного генератора.

Реакция якоря синхронного генератора при активном токе нагрузки. На рис. 10.6 представлены статор и ротор синхронного двухполюсного генератора. На статоре показаны три обмотки, сдвинутые на угол 120^0 друг относительно друга, причем каждая сторона катушки занимает только по одному пазу. Ротор явнополюсной и в данный момент времени занимает вертикальное положение. Магнитный поток ротора индуцирует ЭДС E_1 в обмотках статора. Так как нагрузка активная, то ЭДС и ток совпадают. По правилу буравчика определим направление магнитных силовых линий статора. Как видно из рис. 10.6, МДС статора и ротора направлены под углом 90^0 друг к другу, т.е. поперек. Поэтому реакция якоря считают поперечной.

Построим ниже векторную диаграмму. Вектор F_d направим вертикально вверх, как расположен ротор. От него под углом 90^0 в сторону отставания проводим вектор ЭДС статора. С вектором ЭДС, при активной нагрузке, совпадает ток I_1 статора. Ток I_1 создает МДС статора F_{q1}, которая совпадает с этим током.

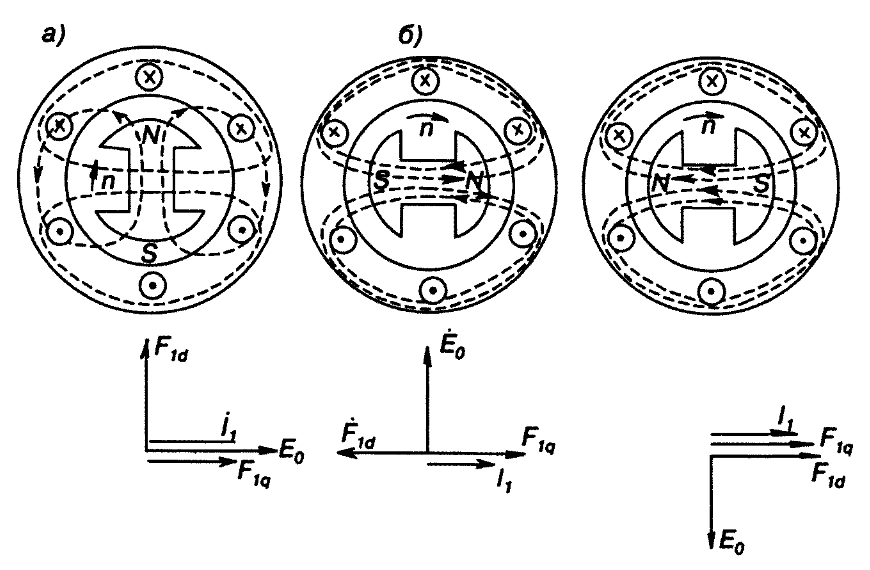


Рис. 10.6. Реакция якоря

При поперечной реакции якоря МДС статора воздействуя на МДС ротора, искажает результирующее магнитное поле машины: под набегающим краем полюса поле ослабляется (магнитные силовые линии статора и ротора направлены встречно) и усиливается под сбегающим краем полюса (магнитные силовые линии статора и ротора совпадают). Размагничивание участков зубцового слоя статора происходит беспрепятственно, а намагничивание зубцовых слоев статора и полюсных наконечников ограничивается магнитным насыщением. В итоге результирующий магнитный поток Φ уменьшается, что приводит к уменьшению ЭДС машины E_1.

Индуктивная нагрузка. При индуктивном токе нагрузки ЭДС статора E_1 опережает ток I_1 на угол 90^0. Следовательно, ток достигает максимального значения после поворота ротора вперед на 90^0 относительно его положения, которое соответствовало максимуму ЭДС (рис. 10.6, *б*). МДС F_{q1} статора и МДС F_d ротора направлены встречно. Этот же результат мы получим, построив векторную диаграмму. Из диаграммы видно, что вектора МДС направлены встречно.

Таким образом, при индуктивном токе нагрузки синхронного генератора реакция якоря продольная размагничивающая.

Емкостная нагрузка. При емкостном токе нагрузки ЭДС отстает от тока на угол 90^0. МДС статора и ротора действуют по оси полюсов согласно (рис.10.6, *в*).

Таким образом при емкостном токе нагрузки синхронного генератора реакция якоря продольная подмагничивающая. Магнитное поле не искажается.

Смешанная нагрузка. Любой нагрузочный режим можно получить посредством векторных диаграмм накладывая их друг на друга. Например, при активно-индуктивной нагрузке, наложив векторные диаграммы при активной и при индуктивной нагрузках. К аналогичному результату придем, если будем вектор F_1 раскладывать на составляющие: поперечную и продольную.

ЭДС синхронного генератора. При нагруженном синхронном генераторе возникают несколько МДС, которые взаимодействуют между собой и создают результирующий магнитный поток. Воспользуемся принципом независимости действия всех МДС, предполагая, что каждая МДС создает свой магнитный поток.

МДС главных полюсов F_d создает магнитный поток Φ_0, который пересекая проводники обмотки статора, наводит основную ЭДС E_0 генератора.

МДС реакции якоря поперечной оси F_{1q} создает магнитный поток Φ_{1q},который наводит в обмотке статора ЭДС$\dot{E}_{1q}$, которая пропорциональна индуктивному сопротивлению по поперечной оси.

МДС реакции якоря по продольной оси F_{1d}. Создает магнитный поток Φ_{1d}, индуцирующий в обмотке статора ЭДС $\dot{E}_{1d}$, пропорциональную индуктивному сопротивлению по продольной оси.

Магнитный поток рассеяния обмотки статора $\Phi_{\delta 1}$, замыкается только в статоре, минуя ротор и наводит в этой обмотке ЭДС рассеяния, пропорциональную индуктивному сопротивлению рассеяния фазы обмотки статора $\dot{E}_{\delta 1} = -jI_1x_1$.

Ток в обмотке статора I_1 создает активное падение напряжения в активном сопротивлении фазы обмотки статора.

$$\dot{U}_{a1} = \dot{I}_1 r_1 .$$

Просуммировав геометрически все перечисленные ЭДС, наведенные в обмотке статора, определяют напряжение на выходе синхронного генератора

$$\dot{U}_1 = \Sigma\dot{E} - \dot{I}_1 r_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\delta 1} - \dot{I}_1 r_1 , \qquad (10.4)$$

где $\Sigma\dot{E}$ — геометрическая сумма всех ЭДС, наведенных в обмотке статора результирующим магнитным потоком машины.

Синхронные машины средней и большой мощности имеют малое активное сопротивление r_1. Поэтому падение напряжения $\dot{I}_1 r_1$ составляет настолько малую величину, что им можно пренебречь:

$$\dot{I}_1 r_1 \approx 0$$

тогда

$$\dot{U}_1 \approx \dot{E} = \dot{E}_l + \dot{E}_{ld} + \dot{E}_{lq} + \dot{E}_1 . \qquad (10.5)$$

Выражения (10.4) и (10.5) представляют собой уравнение напряжений явнополюсного синхронного генератора.

Воздушный зазор между статором и ротором неявнополюсного генератора одинаковый. Поэтому магнитные сопротивления по продольной и по поперечной осям одинаковы. Следовательно, ЭДС статора $\dot{E}_1$, равная индуктивному падению напряжения в обмотке статора, пропорциональна индуктивному сопротивлению реакции якоря x_q, т.е.

$$\dot{E}_1 = -j\dot{I}_1 x_1 . \tag{10.6}$$

Магнитный поток реакции якоря и поток рассеяния статора Φ_1 создаются одним током I_1, поэтому индуктивные сопротивления x_a и x_1 рассматривают, как сумму индуктивных сопротивлений

$$\bar{x}_c = \bar{x}_a + \bar{x}_1$$

представляющую собой индуктивное сопротивление неявнополюсной машины. С учетом этого ЭДС реакции якоря E_1 и ЭДС рассеяния можно рассматривать как сумму

$$\dot{E}_c = \dot{E}_1 + \dot{E}_1 = -j\dot{I}_1 x_a + (-j\dot{I}_l x_l) = -\dot{I}_1 x_1 , \tag{10.7}$$

представляют собой *синхронную ЭДС неявнополюсного генератора*

$$\dot{U}_l = \sum\dot{E} - \dot{I}_l r_l = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{I}_l r_l \tag{10.8}$$

или

$$\dot{U}_l \approx \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_c .$$

10.7. Векторные диаграммы синхронного генератора

На основании уравнения (10.4) построим векторную диаграмму явнополюсного синхронного генератора. При симметричной нагрузке синхронного генератора построение производим для одной фазы.

Вектор ЭДС $\dot{E}_0$ направляем вертикально, а вектор тока $\dot{I}_1$ отстает от

вектора ЭДС $\dot{E}_0$ на угол ψ. Вектор тока $\dot{I}_1$ разложим на две составляющие: активную ($\dot{I}_q = \dot{I}_1\cos\psi$) и индуктивную ($\dot{I}_d = \dot{I}_1\sin\psi$). Первая составляющая создает поперечную реакцию якоря F_{aq}, а вторая составляющая тока создает продольную реакцию якоря F_{ad}. С конца вектора $\dot{E}_0$ откладываем векторы ЭДС

$\dot{E}_{1в} = -j\dot{I}_d x_{ad}$; $\dot{E}_{1q} = -j\dot{I}_q x_{aq}$; $\dot{E}_1 = -j\dot{I}_1 x_1$; $\dot{U}_{al} = -\dot{I}_1 r_1$.

После сложения всех перечисленных ЭДС в последовательности, показанной на рис. 10.7, *а*, получается напряжение на зажимах генератора U_1, опережающее ток I_1 на угол φ, определяемый характером нагрузки во внешней цепи генератора.

При активно-емкостной нагрузке (ток I_1 опережает по фазе ЭДС E_0), поэтому вектор тока I_1 откладываем влево от вектора E_0, а затем строим вектора других величин (рис. 10.7, *б*).

Для неявнополюсного синхронного генератора векторную диаграмму построим на основании уравнения (10.8). Порядок построения такой же как для явнополюсного синхронного генератора (рис.10.7, *в* и *г*).

Диаграмма ЭДС позволяет учесть все факторы, определяющие напряжение синхронного генератора, в их последовательности между собой.

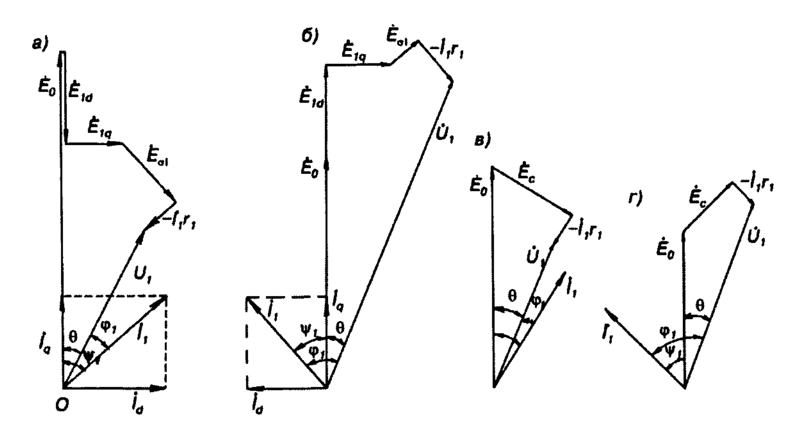


Рис. 10.7. Векторные диаграммы ЭДС синхронного генератора

10.8 Характеристики синхронного генератора

Характеристики дают наглядное представление о ряде основных свойств синхронных генераторов. Они могут быть построены по расчетным данным, с помощью векторных диаграмм, или по данным соответствующих опытов.

10.8.1. Характеристика холостого хода $E = f(I_В)$

На рис. 10.8 показана схема синхронного генератора для проведения опыта холостого хода. Характеристика снимается при разомкнутом рубильнике S. При измении сопротивления регулировочного реостата $r_{рг}$, изменяется величина тока возбуждения $I_В$. Это приводит к изменению МДС F_0, которая равна $F_0 = I_В w_В$; где $w_В$ — число витков обмотки возбуждения. Изменение МДС соответствует изменению магнитного потока $Ф$, индуцирующего ЭДС в обмотках статора. Следовательно, ЭДС E_1 будет изменяться пропорционально $I_В$ до насыщения.

С насыщением магнитопровода пропорциональность между E и $I_В$ нарушается (см. рис. 10.9, *а*). Чтобы характеристики синх-

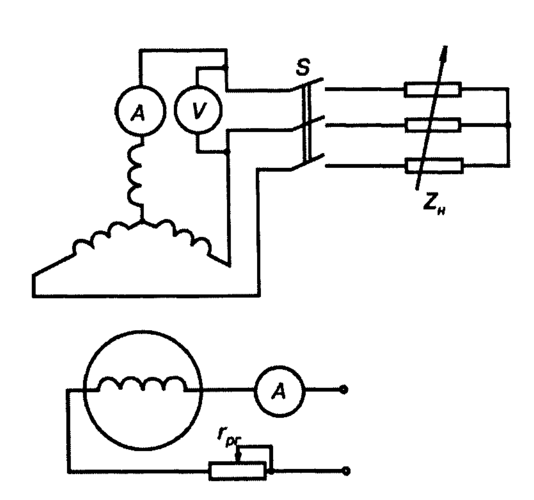


Рис. 10.8. Схема синхронного генератора для снятия рабочих характеристик

ронных генераторов было можно сравнивать друг с другом, их строят в относительных единицах, которые помечают *:

$$E^* = f(I^*_В),$$

где $E^* = E_0/U_{1ном}$ — относительная ЭДС фазы обмотки статора;

$I^*_В = I_{В0}/I_{В0\,ном}$ — относительный ток возбуждения;

$I_{В0ном}$ — ток возбуждения в режиме холостого хода, соответствующий ЭДС холостого хода $E_0 = U_{1ном}$.

10.8.2. Внешняя характеристика $U = f(I_1)$

Для снятия характеристики $U = f(I_1)$ замыкают рубильник S (рис. 10.8) и устанавливают номинальное напряжение $U_{1ном}$ и номинальный ток нагрузки $I_{ном}$ посредством изменения сопротивления нагрузки $Z_Н$. На рис. 10.9, *б* представлены внешние характеристики, соответствующие различным по характеру нагрузкам синхронного генератора. По внешней характеристике можно судить о том, как изменится напряжение на зажимах генератора при изменении его нагрузки и отсутствии регулирования напряжения (в естественных условиях работы машины).

При *активной* нагрузке ($\cos\varphi = 1$) уменьшение тока нагрузки сопровождается увеличением напряжения U_1, что объясняется

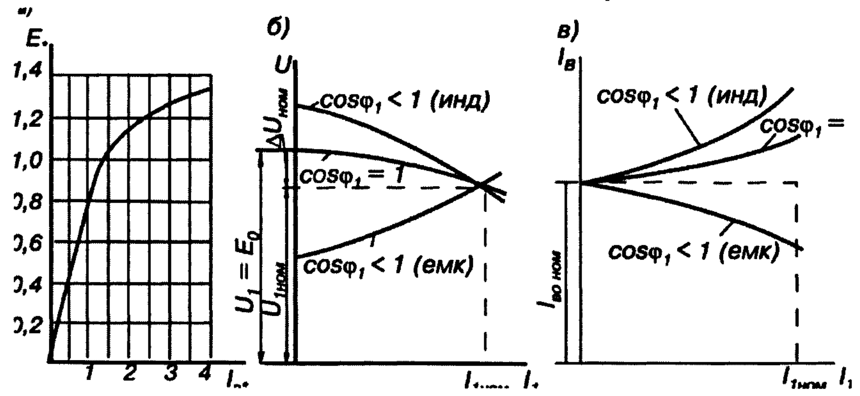


Рис. 10.9. Характеристики:
а — холостого хода; б — внешняя; в — регулировочная

ослаблением размагничивающего действия поперечной реакции якоря и уменьшением падения напряжения в обмотке статора (якоря).

При *индуктивной* нагрузке (cosφ < 1 инд) увеличение напряжения U_1 объясняется ослаблением продольной размагничивающей реакции якоря.

При *емкостной* нагрузке (cosφ <1 емк) уменьшение напряжения U_1 объясняется ослаблением продольной подмагничивающей реакции якоря.

Изменение номинального напряжения %

$$U_{ном} = [(E_0 - U_{1ном})/U_{1ном}]100\ \% . \qquad (10.9)$$

10.8.3. Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика представляет собой зависимость $I_В = f(I)$ при $U = U_Н = const; f = const$ и cosφ = const.

По регулировочной характеристике можно судить о том, в каких пределах необходимо изменять ток возбуждения $I_В$, при изменении тока нагрузки I, чтобы напряжение на зажимах генератора было неизменным. Регулировочные характеристики для различных значений cosφ показаны на рис.10.9, *в*.

10.8.4. Характеристика короткого замыкания

Характеристика короткого замыкания — это зависимость тока в якоре от тока возбуждения, т.е. $I = f(I_В)$ при n = const. На рис. 10.10, *а* показана схема для снятия характеристики, а на рис. 10.10, *б* представлена характеристика короткого замыкания.

Обмотка статора выполнена из меди, поэтому ее активное сопротивление, по сравнению с индуктивным очень мало. Вследствии этого активным сопротивлением можно пренебречь. Т.к. обмотки статора замкнуты накоротко, то сопротивление этих двух обмоток будет нагрузкой генератора.

На рис. 10.10, *в*. показана векторная диаграмма при опыте короткого замыкания. Из диаграммы видно, что ЭДС $E_к$, ин-

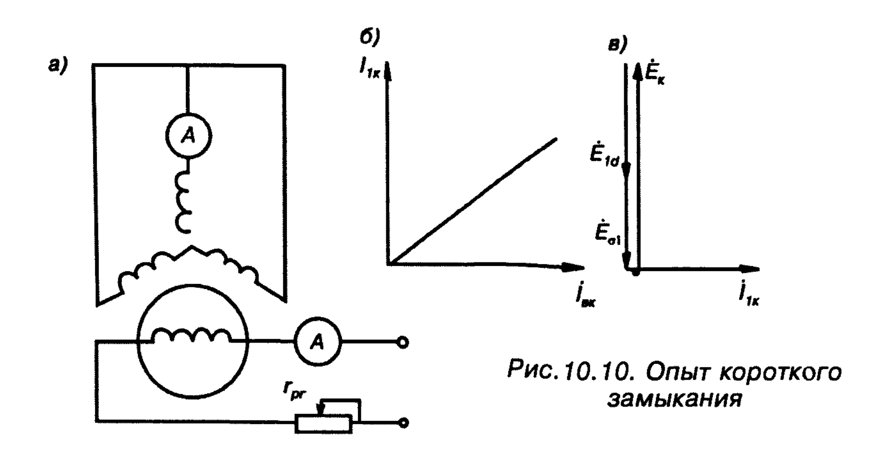


Рис.10.10. Опыт короткого замыкания

дуктированная в обмотках якоря (статора), уравновешивается ЭДС от продольной реакции якоря $\dot E_{1d} = -j\dot I_l x_1$ и ЭДС рассеяния $\dot E_1 = -j\dot I_1 x_1$

$$\dot E_к = \dot E_{1d} + \dot E_1 . \tag{10.9}$$

Практическое значение этой характеристики состоит в том, что она совместно с характеристикой холостого хода дает возможность определить значения токов возбуждения, соответствующие указанным составляющим МДС возбуждения.

10.9. Параллельная работа синхронных генераторов

Генераторы электрических станций России включены параллельно и отдают электроэнергию в единую энергосистему Российской Федерации. Ночью, когда нагрузка падает, часть генераторов отключают и проводят с ними профилактические и ремонтные работы. По мере увеличения нагрузки, генераторы вновь включают в параллельную работу. Этим увеличивают КПД генераторов.

Параллельную работу с сетью применяют при испытаниях синхронных генераторов и дизелей тепловозов.

Для включения генераторов в параллельную работу необходимо соблюдать определенные условия.

Существуют два способа включения синхронных генераторов в параллельную работу: способ точной синхронизации и способ самосинхронизации.

10.9.1. Условия параллельного включения синхронных генераторов

При включении генераторов в параллельную работу с сетью необходимо соблюдать определенные условия, так как несоблюдение любого из условий вызовет чрезмерно большой бросок тока и возникновение при этом ударных электромагнитных моментов и сил, которые могут вызвать повреждение генератора и другого оборудования.

Условиями параллельной работы синхронных генераторов являются :

а) ЭДС генератора E_0 в момент включения его в сеть должна быть равна и противоположна по фазе

$$E_0 = -U_с;$$

б) частоты генератора и сети должны быть одинаковыми

$$f_г = f_с;$$

в) порядок следования фаз генератора и сети должны быть одинаковыми

А – В – С — генератора;

А – В – С — сети.

10.9.2. Способ точной синхронизации

Так назван способ, при котором к сети подключают предварительно возбужденный синхронный генератор, удовлетворяющий вышеперечисленным условиям. Момент соблюдения

этих условий называют *синхронизацией.* Несоблюде-ние любого из этих условий синхронизации приводит к появлению в обмотках статора уравнительных токов, что может привести к повреждению машины.

На рис. 10.11, *а* и *б* показаны две схемы включения синхронного генератора на параллельную работу с сетью по способу точной синхронизации. Сущность этого способа состоит в том, что прежде чем включить генератор в параллельную работу с сетью добиваются соблюдения условий параллельной работы.

По вольтметрам $V_с$ и $V_г$ контролируют соблюдение равенства напряжений. Если показания вольтметров не одинаковы, то изменяя ток возбуждения синхронного генератора добиваются равенства показаний.

При неодинаковых показаниях частотомеров изменяют частоту вращения приводного двигателя, добиваясь равенства

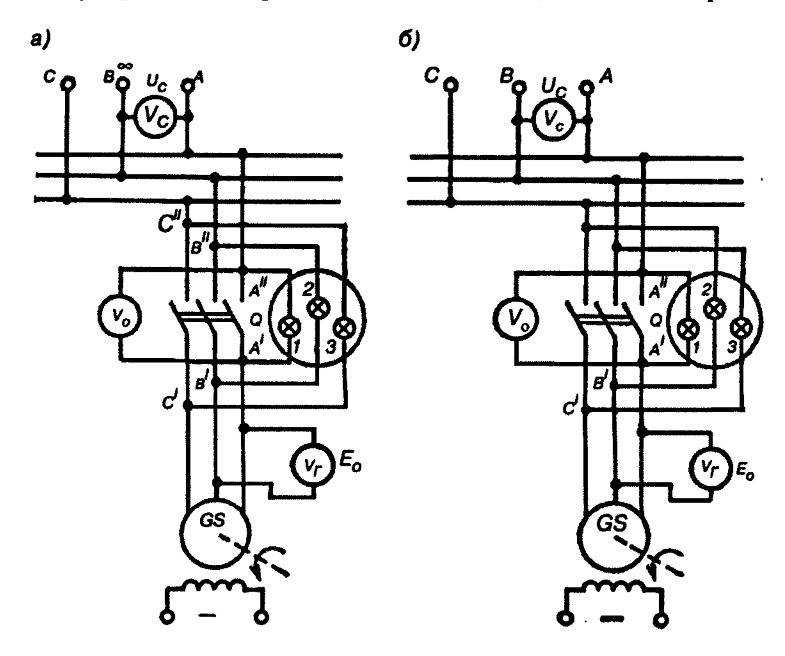


Рис. 10.11. Схема включения трехфазного синхронного генератора на параллельную работу с сетью. Лампы синхроноскопа включены по схеме на потухание света (а) и на врещение света (б)

частот ЭДС генератора и напряжения сети. В то же время корректируют равенство напряжений и ЭДС, так как при изменении частоты вращения ротора синхронного генератора будет изменяться и величина ЭДС.

Определение момента, когда можно включать генератор в сеть, производят при помощи синхронизирующих фазных ламп, которые присоединяют к сети и к зажимам генератора (рис. 10.11, *а, б*). При первом способе включения, который называют включением ламп на потухание, синхроскопные лампы одновременно загораются и потухают. В момент потухания ламп вкючают рубильник *S*. Генератор включается в параллельную работу с сетью.

При втором способе лампа *1* включена так же как в схеме рис. 10.11, *а*, но лампы *2* и *3* — различными фазами генератора и сети. В этом случае при соблюдении перечисленных выше условий лампа *1* не светится, а лампы *2* и *3* находятся под линейным напряжением с светятся с одинаковой яркостью, что и является критерием правильности момента включения. При неравенстве частот $f_г - f_с = 0$ лампы *1*, *2*, *3* (рис. 10.9, *б*) загораются и погасают поочередно, и создается впечатление вращения света, причем при $f_г > f_с$ вращение происходит в одну сторону, а при $f_г > f_с$ — в другую.

Если при собранной схеме (рис. 10.11, *б*) вместо вращающегося света получаем одновременное погасание и загорание ламп, то это будет указывать на несоблюдение третьего условия параллельной работы, а именно, неправильного чередования фаз генератора и сети. В этом случае необходимо поменять местами начала двух фаз обмотки статора генератора. Для более точного выбора момента включения рубильника *S* вольтметр V_0 включают параллельно синхроскопным лампам.

10.9.3. Метод самосинхронизации

Сущность метода самосинхронизации заключается в том, что ротор невозбужденного генератора приводят во вращение приводным двигателем до близкой к синхронной частоты вращения (допускается отклонение до 2–3%. Затем генератор подключают к

сети. Во избежание пробоя обмотки ротора от перенапряжения в момент подключения генератора к сети, ее или закорачивают или замыкают на некоторое балластное сопротивление.После включения невозбужденного генератора в сеть немедленно включают ток возбуждения и генаратор втягивается в синхронную работу.

Однако при самосинхронизации неизбежно возникают значительные толчки тока, превышающие номинальное значение тока генератора, так как включение невозбужденного генератора в сеть с напряжением $U_с$ равнозначно внезапному короткому замыканию этого генератора на холостом ходу с $E = U_с$. Но толчок тока при самосинхронизации меньше, чем при коротком замыкании.

Когда генератор втянется в синхронную работу ток генератора быстро уменьшается.

По действующим в России стандартам метод самосинхронизации можно применять только в том случае, если толчок тока не будет превышать 3,5 $I_н$.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия синхронного генератора?
2. Каковы способы возбуждения синхронных машин?
3. Каковы условия параллельной работы синхронных генераторов?
4. Как включаются лампы синхроскопов?

Глава 11.

Синхронные генераторы ТПС

11.1 Преимущества генераторов переменного тока перед генераторами постоянного тока

• Синхронные генераторы допускают более высокую частоту вращения, чем генераторы постоянного тока. А механическая мощность

$$P = fv,$$

где f — сила, Н;
V — скорость, м/с.

Это позволяет снизить массу дизель-генератора.

• Мощность генератора в приемлемых габаритах может быть увеличена до 7500 к Вт, что позволяет снять ограничения по мощности.

• Синхронные генераторы более надежны, т.к. отсутствут коллектор.

• Коллектор требует значительных эксплуатационных затрат на его содержание (регулярно производить продорожку, снимать фаски коллекторнных пластин, заменять изношенные щетки и т. д.).

• Уменьшается количество щеток (для сравнения) в генераторе ГП311Б десять бракетов с девятью щеткодержателями, и в каждом щеткодержателе по две щетки, а в генераторе ГС-501А по два щеткодержателя на каждое кольцо.

• Коллектор изготавливают из медных пластин, а контактные кольца из стали. Следовательно стоимость синхронного генератора значительно ниже коллекторного.

• Обмотка якоря расположена на статоре, поэтому изоляция менее дорогая.

• Мощность обмотки возбуждения синхронного генератора состовляет 1,5% мощности генератора.

• Отсутствуют добавочные полюса с обмотками возбуждения, что также снижают стоимость генератора.

К недостаткам следует отнести отсутствие начального пускового момента синхронного генератора в режиме двигателя, Поэтому для пуска дизеля применяют специальные стартеры или стартер-генераторы — машины постоянного тока.

Основные технические данные синхронных генераторов приведены в табл. 11.1

Таблица 11.1

Показатель	Типы электрических машин		
	ГС-501АУ1	ГС515У2	А-714УХЛ
Мощность,кВт	2800	1400	2800/630
Напряжение, В,			
низшее	360	175	366 /400
высшее	580	280	580/400
Ток, А, при напряжении			
низшем	2*2400	2*2500	2*2400/2*570
высшем	2*1500	2* 1540	2*1520
Частота вращения,			
об/мин	1000	1000	1000
Серия тепловоза	2ТЭ116,ТЭП70	ТЭМ7	2ТЭ121

* В числителе данные тягового синхронного генератора, в знаменателе — вспомогательного генератора.

11.2. Устройство синхронного генератора ГС501А

Синхронный генератор ГС 501А (рис. 11.1) представляет собой электрическую машину защищенного исполнения с явновыраженными полюсами на роторе, независимым возбуждением и принудительной вентиляцией.

Корпус статора сварной, изготовлен из толстолистовой стали. С обеих сторон корпуса приварены лапы для крепления генератора на поддизельную раму. Внутрь корпуса запрессован сердечник *4*, выполненый из штампованных сегментных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. В листах сердечника сделаны 144 паза, куда уложена волновая двухслойная обмотка *3*. От «распушения» зубцы сердечника предохраняются нажим

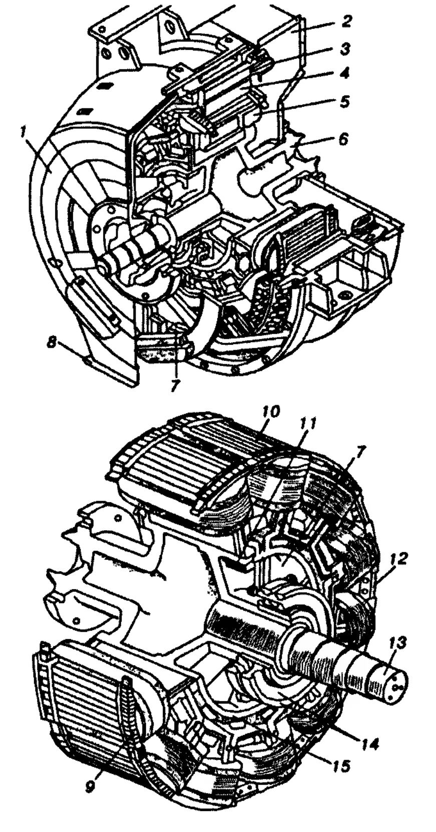


Рис. 11.1 Конструкции синхронного тягового генератора ГС-501А (а) и его ротора(в):

1 — подшипниковый щит; 2 — воздушный патрубок; 3 — обмотка якоря; 4 — пакет статора; 5 — обмотка возбуждения; 6 — ротор; 7 — шины; 8 — обмотка якоря; 9 — демпферная обмотка; 10 — полюс; 11 — балансировочные грузы; 12 — накладка; 13 — вал; 14 —контактные кольца; 15 —контактный сегмент

ными кольцами. Для охлаждения в сердечнике имеется 120 вентиляционных аксиальных каналов диаметром 27 мм. Пазы выстланы пленкостеклотканью. Катушки статора изолированы от корпуса полиамидной и активированной фторопластовой пленками.

Обмотка статора — это две трехфазные звезды, сдвинутые одна относительно другой на угол 30°. Секция обмотки прямоугольного сечения, состоит из девяти уложеных друг на друга широкой стороной проводников. Лобовые части обмотки *3* якоря крепят с помощью пластмассовых обмоткодержателей с запрессованными в них шпильками.

Фазные выводы представляют собой гибкие шины, набранные из тонкой медной ленты и припаянные к жестким луженым наконечникам. Обмотка статора имеет шесть выводов (по три от каждой «звезды») и два вывода нулевых точек.

Корпус ротора *6* генератора сварной, подобен корпусу якоря генератора ГП-311Б. На корпус с натягом нашихтован и спрессован пакет цельноштампованных листов электротехнической стали. В пакете выштампованы двенадцать па-

зов формы «ласточкин хвост». В пазах клиньями крепят полюсы 10 моноблочной конструкции. Сердечник полюса ротора набран из листов стали толщиной 1,4 мм, спрессованных и стянутых четырмя стальными заклепками. Катушки полюсов выполнены из медной ленты, намотанной на ребро. Между витками проложена изоляция.

Катушка в сборе с сердечником пропитана эпоксидным компаундом и имеет изоляцию типа «Монолит-2» класса F. Чередование полярности полюсов достигается поочередной установкой катушек с различными направлениями намотки витков. Катушки соединены последовательно, а выводы подсоединены к стальным контактным кольцам *14*. Кольца от корпуса изолированы пластмассой (класс B).

С противоположной контактным кольцам стороны ротор имеет фланец, соединенный эластичной пластинчатой муфтой с коленчатым валом дизеля.

Подшипниковый щит 1 сварной конструкции, крепится болтами к корпусу статора. В щите имеется съемная ступица (капсула), обеспечивающая замену подшипника без снятия генератора с тепловоза. Подшипник ротора самоустанавливающийся, двухрядный, со сферическими роликами.

Щетки марки ЭГ-4, помещенные в латунные щеткодержатели, подводят ток к обмотке возбуждения. Щеткодержатели укреплены на двух подвесках (на каждой подвеске по три щеткодержателя).

Воздух для охлаждения подается в генератор через сборный стальной патрубок со стороны, противоположной контактным кольцам (со стороны дизеля). В нижней части подшипникового щита под контактными кольцами укреплен стальной патрубок, через который выбрасывается нагретый воздух. Охлаждающий воздух забирается снаружи через фильтры, установленные с боков кузова.

11.3. Тяговый агрегат

На некоторых современных тепловозах для снижения массы, числа машин и уменьшения габаритных размеров применяют тяговые агрегаты, включающие в себя синхронный гене-

ратор ГС, питающий через выпрямитель тяговые двигатели, и генератор собственных нужд ГСН.

Агрегат имеет удлиненную станину (рис. 11.2), по сравнению с генератором ГС501. К станине приварены лапы для ее крепления на поддизельной раме.

Роторы агрегата имеют общий корпус безвальной конструкции. На корпусе расположены две самостоятельные системы полюсов — тягового генератора и генератора собственных нужд.

Конструкция тягового синхронного генератора такая же как у генератора ГС501.

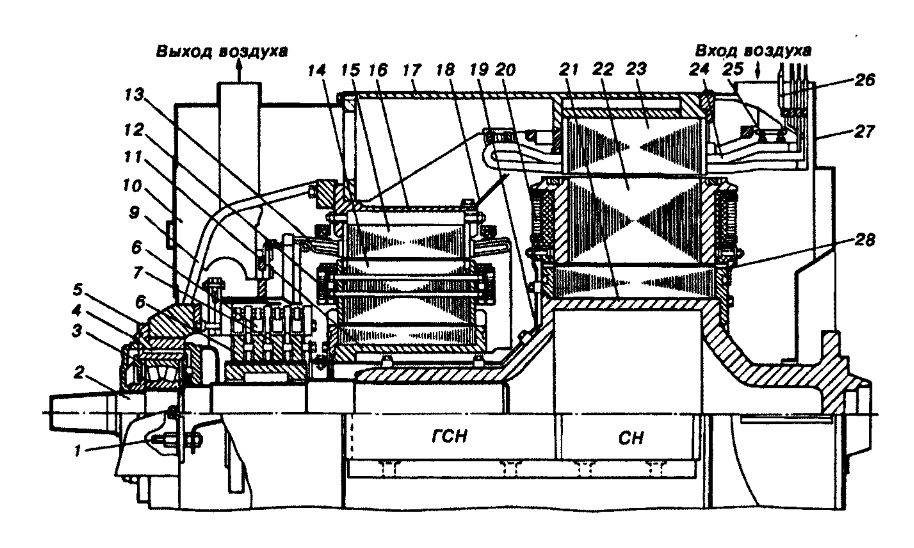


Рис. 11.2. Тяговый агрегат:

1 — выводы обмоток ротора; 2 — вал; 3 — подшипник; 4 — масленка; 5 — выемная ступица; 6, 7 — контактные кольца; 8 — щеткодержатели; 9 — подшипниковый щит; 10 — патрубок для вывода охлаждающего воздуха; 11, 21 — остовы ротора вспомогательного и тягового генератора; 12, 14 — катушки полюсов роторов; 13, 24 — обмотки статоров; 14, 23 — сердечники статоров; 16,17 — корпуса статоров генераторов; 18 — направляющий щиток; 19 — соединение обмотки ротора с контактными кольцами; 20, 22 — сердечники полюсов роторов; 25 — крепление лобовых частей катушек; 26 — выводы фаз и нулевых точек звезд обмоток статора; 27 — патрубок для выхода воздуха; 28 — соединение катушек полюсов ротора

Генератор собственных нужд обеспечивает питание обмотки возбуждения тягового генератора, привода вспомога-тельных механизмов, устройств автоматики. На роторе расположены двенадцать полюсов, обмотки возбуждения которых получают питание от собственной обмотки статора через выпрямитель. В пазах обмотки статора расположены две трехфазные обмотки сдвинутые на угол 30^0.

Контрольные вопросы

1. Каковы преимущества тягового синхронного генератора по сравнению с тяговым генератором постоянного тока ?
2. Почему на обмотке статора расположены две трехфазные «звезды»?
3. Из каких материалов изготовлен сердечник статора ?
4. Как обеспечивается разная полярность полюсов ?

Глава 12.

Асинхронные машины

12.1. Устройство асинхронной машины

Асинхронной машина называют потому, что частота вращения ротора и вращающегося магнитного поля статора не одинаковы.

Асинхронная машина как и всякая электрическая машина состоит из неподвижной части статора и вращающейся части ротора (рис. 12.1).

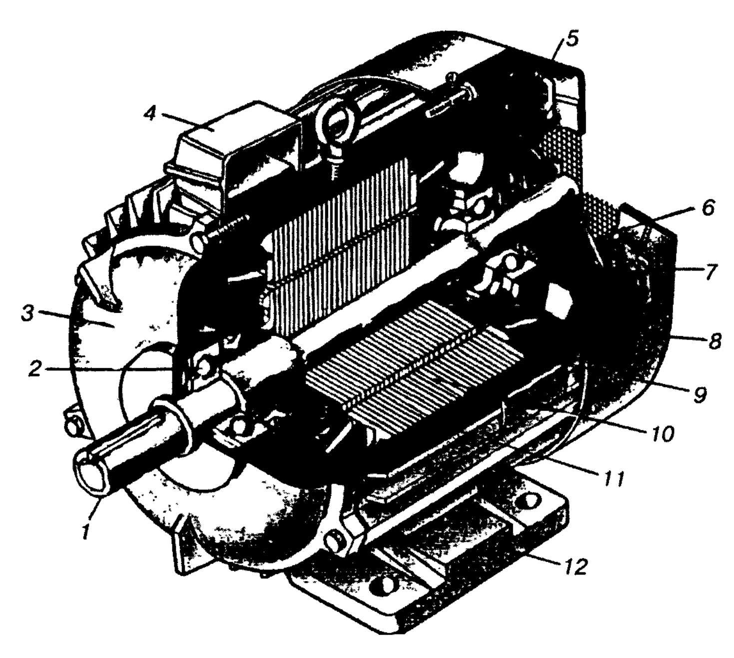


Рис. 12.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором:

1 — вал; 2, 6 — подшипники; 3, 7 — подшипниковые щиты; 4 — коробка выводов; 5 — вентилятор; 8 — кожух вентилятора; 9 — сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; 10 — сердечник статора с обмоткой; 11 — корпус; 12 — лапы

Статор асинхронной машины практически не отличается от статора синхронной. Он состоит из корпуса *11*, который может быть изготовлен из различных конструкционных материалов: стали, чугуна, цветных металлов и их сплавов. В корпус запрессован сердечник *10*, изготовленный из отдельных пластин электротехнической стали. В сердечнике сделаны пазы, куда укладывают трехфазную обмотку. С торцов корпус закрыт подшипниковыми щитами *3* и *7*. Подшипниковые щиты обычно выполняют из тех же материалов, что и корпус. В подшипниковых щитах расположены подшипники *2* и *6*, на которые опирается вал *1* ротора. На вал напрессован сердечник *9*, выполненный из отдельных пластин электротехнической стали. В сердечнике сделаны пазы в которые заливают расплавленный алюминий. При охлаждении алюминия образуются стержни, к концам которых припаивают алюминиевые кольца. Чаще всего кольца и стержни отливают одновременно. Образуется короткозамкнутая обмотка (рис. 12.2) типа «беличье колесо». В некоторых машинах вместо алюминиевой «беличьей клетки» применяют медную. Тогда в пазы ротора просто укладывают медные стержни концы которых замыкают медными кольцами. Вместе с кольцами отливают вентиляционные лопатки, способствующие охлаждению двигателя. Для уменьшения габаритов двигателя охлаждающий поток воздуха направляют центробежным вентилятором *5*, который напрессовывают на вал ротора. Вентилятор прикрыт кожухом *8*, изготовляемый из стали, а в последнее время из пластмассы.

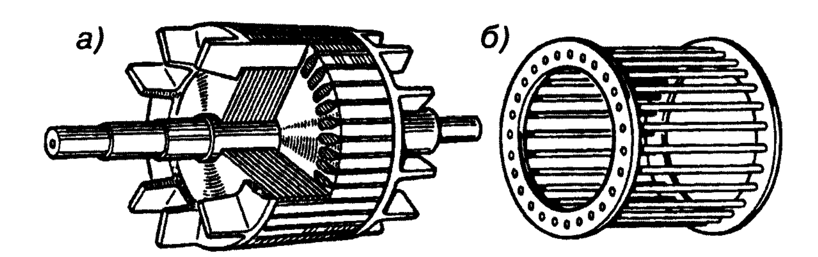


Рис. 12.2. Короткозамкнутый ротор:

а — ротор выполненный методом литья под давлением; б — обмотка « белечья клетка»

Двигатель монтируют посредством лап *12*, либо с помощью фланца. В последнем случае на подшипниковым щите (чаще всего со стороны выступающего конца вала) выполняют фланец с отверстиями для крепления двигателя на рабочем органе.

Другой разновидностью асинхронных двигателей являются двигатели с фазным ротором (рис. 12.3). Ротор конструктивно отличается от короткозамкнутого. На валу *8* напрессован шихтованный сердечник *5* с трехфазной обмоткой, выполненной аналогично обмотке статора. Эту обмотку соединяют «звездой», а ее концы присоединяют к трем контактным кольцам *11*, напрессованным на вал и изолированным друг от друга и от вала. По кольцам контактируют щетки, помещенные в щеткодержатели (рис. 12.4). На каждое контактное кольцо *1* накладывают обычно две щетки 2, находящиеся в щеткодержателях 3. Определенное нажатие на щетку обеспечивается пружинами щеткодержателя. К щеткам подключают пусковые

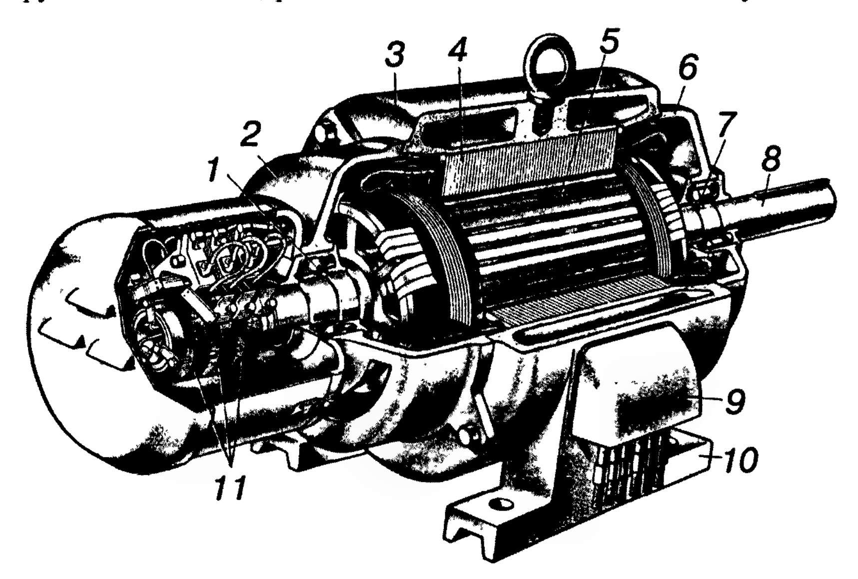


Рис. 12.3. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором:

1, 7 — подшипники; 2, 6 — подшипниковые щиты; 3 — корпус; 4 — сердечник статора с обмоткой; 5 — сердечник ротора; 8 — вал; 9 — короб выводов; 10 — лапы; 11 — контактные кольца

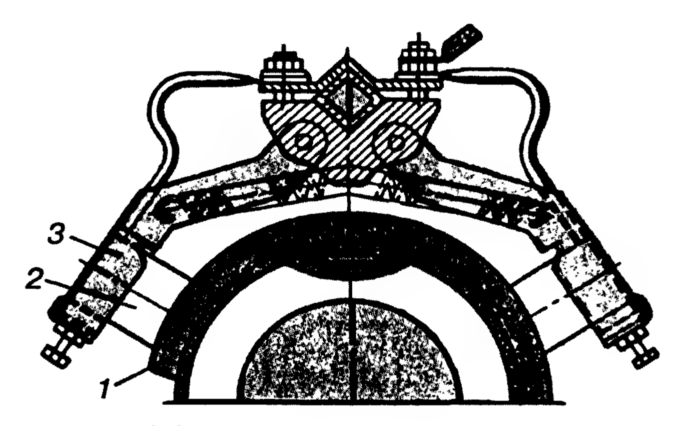


Рис. 12.4. Расположение щеткодержателей:

1 — контактное кольцо; 2 — щетка; 3 — щеткодержатель

реостаты ПР, создающими в цепи ротора добавочное сопротивление $R_{доб}$.

На рис. 12.5 показана схема включения асинхронных двигателей с короткозамкнутым (*а*) и фазным (*б*) ротором.

Выводы обмоток выводят на зажимы коробки выводов *4* (см. рис. 12.1) и *9* (см. рис. 12.3). К трехфазной сети обмотки статора подключают «звездой» или «треугольником» (рис. 12.6). Обычно на табличке, укрепленной на корпусе двигателя указывают два

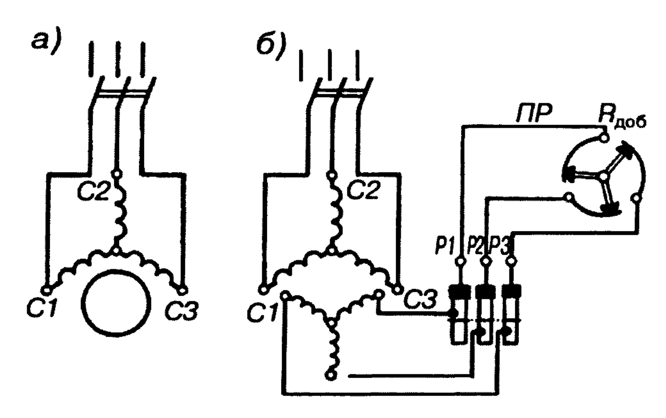


Рис. 12.5. Схемы включения трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором

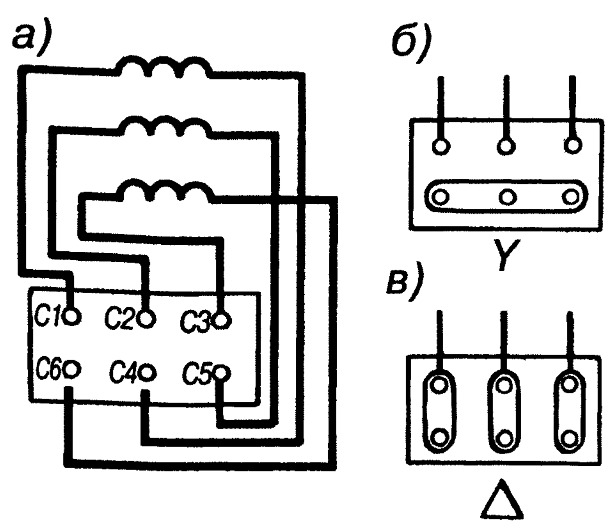


Рис. 12.6. Расположение выводов обмотки статора асинхронного двигателя (а) и положение перемычек при соединении обмоток статора « звездой» (б) и «треугольником» (в)

напряжения, отличающиеся в $\sqrt{3}$ раз. Если в сети большее напряжение из указанных в табличке, то двигатель включают «звездой», при меньшем напряжении «треугольником». Например, двигатель рассчитан для включения в сеть на напряжение 380/220 В. Если в сети линейное напряжение 380 В, то обмотку статора включают «звездой», а если линейное — 220 В, то обмотку соединяют «треугольником» (рис. 12.6, *в*).

12.2. Принцип действия асинхронного двигателя

Если подключить обмотки статора асинхронного двигателя к источнику трехфазного тока, то появится вращающееся магнитное поле.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки статора и ротора. В обмотках статора индуктируется ЭДС самоиндуктии, а в обмотках ротора — ЭДС взаимоиндукции. Так как проводники ротора

замкнуты (в коротко-замкнутом роторе кольцами, а в фазном роторе пусковым реостатом), то по ним потечет ток.Ток ротора будет создавать свое магнитное поле. Взаимодействие полей статора и ротора приводит к появлению выталкивающей силы. Ротор начнет вращаться. Вращение ротора посредством вала передается испонительному механизму.

12.3. Скольжение и частота тока ротора

Ротор всегда будет вращаться с меньшей скоростью, чем вращающееся магнитное поле статора, так как при одинаковой скорости вращения не будет пересечения проводников ротора магнитными силовыми линиями вращающегося поля, т.е. ротор будет вращаться вместе с магнитными силовыми линиями.

Относительная разность частот вращения вращающегося магнитного поля статора и самого ротора называют *скольжением*:

$$S = (n_1 - n_2)/n_1\,; \qquad (12.1)$$

в процентах

$$S = ((n_1 - n_2)\,/\,n_1)100\%\,, \qquad (12.2)$$

где n_1 — частота вращения вращающегося магнитного поля статора, об / мин;

n_2 — частота вращения ротора, об / мин.

Через угловую частоту вращения (ω, c^{-1})

$$S = (\omega_1 - \omega_2)/\omega_1 \qquad (12.1,\ a)$$

$$S = ((\omega_1 - \omega_2)/\omega_1)100\% \qquad (12.2,\ a)$$

Частота вращения поля статора относительно ротора равна разности частот вращения $n_s = n_1 - n_2$. Вращающееся магнитное поле, обгоняя ротор с частотой вращения $n_s = n_1 - n_2$, индуктирует в обмотках ротора ЭДС с частотой f_2. Частота тока в роторе

$$f_2 = (pn_s)/60 = p(n_1 - n_2)/60 = (p(n_1 - n_2)/60)(n_1/n_1) =$$

$$= (pn_1/60)(n_1 - n_2)/n_1 = f_1 S \qquad (12.3)$$

При частоте тока 50 Гц и скольжении 5% частота тока в роторе составляет $f_2 = 50 \times 0{,}05 = 2{,}5$ Гц.

12.4. Реверсирование

Если поменять местами любые две фазы из трех питающие асинхронный двигатель, то изменится порядок следования фаз и это приведет к изменению направления вращения магнитного поля статора. Ротор асинхронного двигателя изменит свое направление вращения.

12. 5. ЭДС, МДС и токи при неподвижном роторе

Основной магнитный поток индуцирует в обмотке статора ЭДС (см. гл.9)

$$E_1 = 4{,}44\ \Phi_m f_1 w_1 k_{об1}.$$

Кроме основного магнитного потока, который сцепляется с проводникам обмоток статора и ротора существует еще магнитный поток рассеяния, сцепляющийся только с проводниками одной обмотки $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$. Потоки рассеяния создают ЭДС потоков рассеяния:

$$\dot{E}_1 = -j\dot{I}_1 x_1; \qquad (12.4)$$

$$\dot{E}_2 = -j\dot{I}_2 x_2, \qquad (12.5)$$

где x_1 и x_2 — индуктивные сопротивления рассеяния фазной обмотки статора, Ом.

ЭДС неподвижного ротора E_2

$$E_2 = 4{,}44\Phi_m w_2 f_2 k_{об2}, \qquad (12.6)$$

где Φ_m — амплитуда магнитного потока, Вб;

w_2 — количество витков обмотки статора;
f_2 — частота тока в роторе, Гц;
$k_{об2}$ — обмоточный коэффициент, учитывающий укорочение или удлинение шага обмотки, а также распределение обмоток по пазам.

Ток обмотки статора I_1

$$I_1 = E_1/Z_1 = E1\Big/(\sqrt{r_1^2 + x_1^2}) =$$

$$= (4{,}44\Phi_m w_1 f_1 k)\Big/\left(\sqrt{r_1^2 + (j2\pi f_1 L_1)^2}\right). \tag{12.7}$$

Ток неподвижного ротора, при $f_1 = f_2$

$$I_2 = E_2\Big/\left(\sqrt{r_2^2 + (j2\pi f_2 L_2)^2}\right) =$$

$$= (4{,}44\Phi_m w_2 f_2 k)\Big/\left(\sqrt{r_2^2 + (j2\pi f_1 L_2)^2}\right) \tag{12.8}$$

Токи обмоток статора и ротора создают соответственно свои МДС F_1 и F_2

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 = \bar{F}_0\ , \tag{12.9}$$

где $\bar{F}_0$ — результирующая МДС двигателя, численно равная МДС обмотки статора в режиме холостого хода.

12.6. ЭДС, токи и МДС при вращающемся роторе

ЭДС, токи и МДС статора при неподвижном и вращающемся роторе имеют одинаковые выражения (см. 12.7, 12,9). Отличаются только выражения для ротора.

Основной магнитный поток Φ обгоняя ротор с частотой вращения $n_s = n_1 - n_2$, индуцирует в его проводниках ЭДС E_{2s} с учетом (12.3)

$$E_{2s} = 4{,}44\Phi_m f_1 s w_1 k_{об2} \qquad (12.10)$$

откуда

$$E_{2s} = E_2 s \qquad (12.11)$$

Ток, вращающегося ротора I_{2s}

$$I_{2s} = E_{2s} \Big/ \sqrt{r_2^2 + (j2\pi f_1 s L_2)^2} = \\ = E_{2s} \Big/ \sqrt{r_2^2 + (j2\pi f_1 s L_2)^2}. \qquad (12.12)$$

При вращении ротора $S = 5\%$, а при неподвижном — $S = 100\%$. Следовательно ЭДС неподвижного ротора будет больше ЭДС вращающегося ротора в: 100% /5% = 20 раз.

Сравнив формулы (12.8) и (12.12) устанавливаем, что числитель формулы (12.8) больше числителя формулы (12.12) в 20 раз. Однако, в формуле (12.12) s входит в знаменатель, в подкоренное выражение. Поэтому знаменатель выражения (12.12) будет меньше знаменателя выражения (12.8) приблизительно в 20 раз, что составляет $20/\sqrt{20} \approx 5$. Поэтому ток вращающегося ротора меньше тока неподвижного ротора примено в 5–8 раз.

Таким образом, при включении двигателя, когда ротор неподвижен из-за инерции, наблюдается бросок пускового тока, превышающего номинальное значение, примерно в 5–8 раз. По мере разгона ротора пусковые токи уменьшаются до номинального значения при наминальной нагрузке. Эти токи не опасны для двигателя, т.к. они кратковременны, их продолжительность 1–2с, и за это время они не успевают нагреть обмотки, но в сетях малой мощности могут вызвать падение напряжения. О способах их уменьшения см. ниже.

12.7. Режимы работы асинхронной машины

Асинхронные машины могут работать в двигательном, генераторном и в режиме электромагнитного торможения.

В *двигательном режиме* электрическая мощность P_1 поступающая из сети

преоразуется в механическую мощность P_2 и передается исполнительному механизму *ИМ* (рис. 12.7, *б*). Из формулы (12.1) следует, что при неподвижном роторе $n_2 = 0$, скольжение $s = 1$; при синхронной частоте вращения когда $n_2 = n_1$, $s = 0$. Таким образом, при двигательном режиме

$$0 < s < 1$$

Для асинхронных двигателей $s_{ном} = 1–8\%$; при этом для двигателей большой мощности $s_{ном} = 1\%$, а для двигателей малой мощности $s_{ном} = 8\%$.

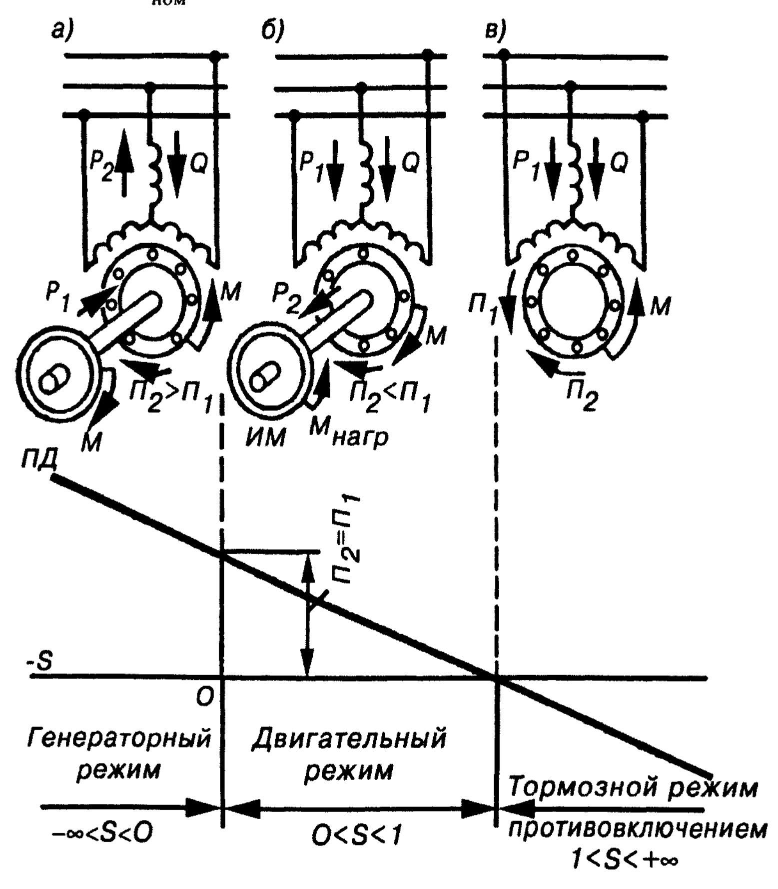


Рис. 12.7. Режимы работы асинхронной машины

Для осуществления *генераторного режима* работы асинхронной машины ее необходимо включить в сеть переменного тока и вращать с помощью соответствующего приводного двигателя (двигатель внутреннего сгорания, машина постоянного тока и другие источники механической энергии), в направлении вращения вращающегося магнитного поля с частотой вращения $n_2 > n_1$ В этом случае скольжение будет отрицательным, а ЭДС, индуцированная в обмотках ротора, изменит свое направление. Также изменит свое направление электромагнитный момент M, так как станет тормозным (рис. 12.7, *а*). Механическая мощность приводного двигателя преобразуется в электрическую активную мощность P_2 переменного тока. Вращающееся магнитное создается реактивной мощностью Q трехфазной сети, в которую включен генератор и куда он отдает вырабатываемую активную мощность P_2. Таким образом для работы асинхронного генератора нужен источник переменного тока, создающий возбуждение генератора, так как в нем возбуждается вращающееся магнитное поле.

Диапазон изменения скольжения в генераторном режиме $-\infty < S < 0$.

Режим торможения противовключением. Если у работающего асинхронного двигателя произвести реверсирование, т.е. поменять местами любые две фазы из трех, то асинхронный двигатель под действием сил инерции будет продолжать вращаться в прежнем направлении. Таким образом, поле статора и ротор будут вращаться в противоположных направлениях. Однако, электромагнитный момент, действующий в сторону вращения поля статора, будет тормозить ротор (рис. 12.7, *в*), $1 < S < +\infty$. На практике в этом режиме $1 < S < 2$.

В режиме противовключения машина потребляет также механическую мощность с вала или с ротора, так как внешний вращающий момент действует в сторону вращения вала. Как мощность, потребляемая из сети, так и мощность, потребляемая с вала, расходуется на потери в машине. Полезной мощности в этом режиме машина не развивает, а в отношении нагрева рассматриваемый режим является тяжелым.

Из рассмотренных режимов работы асинхронной машины наиболее эффективным является двигательный. Асинхронные двигатели являются наиболее перспективными при использовании в качестве тяговых на ТПС.

В настоящее время асинхронные двигатели применяются в качестве вспомогательных в ТПС.

12.8. Электромагнитный момент

Обмотки статора и ротора обладают активным и индуктивным сопротивлением, которые можно изобразить на схеме замещения асинхронного двигателя. Однако активное и индуктивное сопротивления ротора во много раз меньше чем аналогичные сопротивления статора (в короткозамкнутом роторе проводники замкнуты кольцами, а в статоре катушки фаз содержат довольно значительное количество витков и обладают значительным сопротивлением). Поэтому в электрических машинах применяют такой прием: все электрические величины ротора пересчитывают (приводят) к аналогичным величинам статора, т.е. обмотку ротора с числом фаз m_2, обмоточным коэффициентом $k_{об2}$ и числом витков одной фазной обмотки w_2 приравнивают к таким же величинам обмотки статора. Приведенные (пересчитанные) величины обозначают штрихом, например, U_2^1, I_2^1 и т. д. Кроме того, статор и ротор разделены воздушным зазором, который обладает значительным магнитным сопротивлением. Это сопротивление в схеме замещения показывают в виде цепи намагничивания (рис. 12.8, *б*). Так как магнитный поток создается индуктивным током, то указанное сопротивление — индуктивное. Но, приведение параметров ротора к параметрам статора не должно отразиться на его энергетических показателях: все мощности, фазовые сдвиги векторов ЭДС и токов ротора должны оставаться такими же, как и в реальном асинхронном двигателе.

На рис. 12.8, *а* показана схема включения в сеть асинхронного двигателя с фазным ротором и соответствующая ей схема замещения с вынесенным контуром намагничивания.

На схеме замещения приняты следующие обозначения:

$U_ф$ — действующее значение фазного напряжения, В

I_m, I_1, I_2^1 — фазные токи соответственно намагничивания, обмотки статора и приведенного ротора, А;

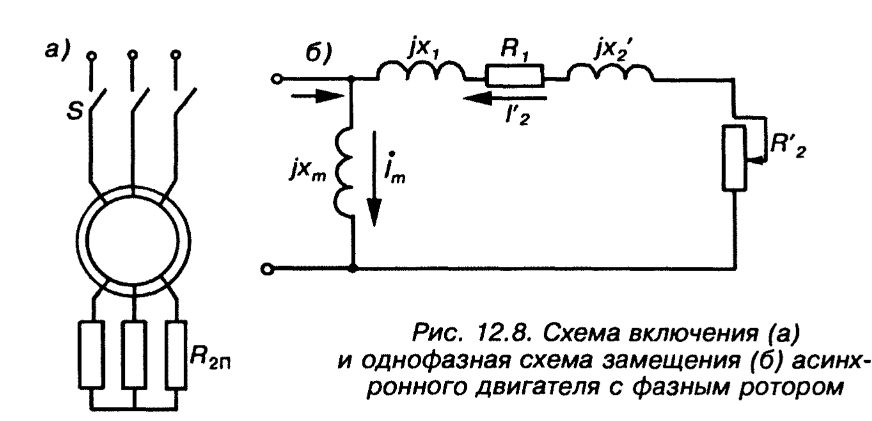


Рис. 12.8. Схема включения (а) и однофазная схема замещения (б) асинхронного двигателя с фазным ротором

x_m — индуктивное сопротивление контура намагничивания,Ом;

R_1, R_2^{I} — активные фазные сопротивления обмоток соответственно статора и ротора; последнее приведено к обмотке статора, Ом;

x_1, x_2^{1} — индуктивные сопротвления, обусловленные полями рассеяния обмоток статора и ротора; последнее приведено к обмотке статора, Ом;

$R_{2п}^{1}$ — приведенное к обмотке статора активное фазное сопротивление, включенное последовательно в цепь обмотки ротора, Ом; имеется в виду, что в фазах включены симметричные последовательные сопротивления $R_{2п}$ (см. рис. 12.8, *а*).

Схема замещения асинхронного двигателя получена при определенных допущениях. В частности ее параметры считают не зависящими от режима работы, т.е. не учитывают насыщение магнитопровода, добавочные потери, а также влияние пространственных и временных гармонических составляющих МДС обмоток статора и ротора.

Для вывода уравнения механической характеристики рассмотрим баланс мощности в двигателе. Электромагнитная мощность $P_{эм}$, передаваемая ротору от статора вращающимся магнитным полем, определяется электромагнитным моментом M, развиваемым двигателем и равна:

$$P_{эм} = M\omega_1 = Mn/9{,}55 .$$

Мощность, передаваемую ротору, можно разделить на две составляющие: мощность, преобразуемую в механическую $P_м$, и мощность потерь $P_{эл2}$ в роторе.

Первая составляющая: $P_м = M_2\omega_2$.

Вторая составляющая представляет собой электрические потери в обмотках ротора и потери на перемагничивание ротора. Как правило, потери в стали ротора значительно меньше электрических потерь, в связи с чем первыми можно пренебречь. Тогда

$$P_{эм} = P_м + \Delta P_{эл2}$$

или

$$M\omega_1 = M\omega_2 + \Delta P_{эл2} ,$$

отсюда

$$\Delta P_{эл2} = M(\omega_1 - \omega_2) = M\omega_1 S . \qquad (12.13)$$

Учитывая, что

$$P_{эл2} = m(I_2')^2 R^1_{2п} ,$$

где m — число фаз;

$$R'_{2п} = R'_2 + R'_п.$$

Можно записать выражение для момента

$$M = [m(I_2')^2 R'_{2п}]/(\omega_1 S) = [m_1(I_2')^2 R'_{2п}]p/2\pi f_1 S. \qquad (12.14)$$

Из схемы замещения определим величину тока

$$I_2' = U_ф \Big/ \sqrt{(R_1 + R'_{2п})^2 + (x_1 + x_2')^2} . \qquad (12.15)$$

Подставив (12.15) в (12.14) получим выражение момента для асинхронного двигателя

$$M = \frac{m_1 U_1^2 R'_{2п} p}{2\pi f s\left[(R_1 + R_2')^2 + (x_1 + x_2')^2\right]}. \qquad (12.16)$$

Параметры R_1, R_2', x_1, x_2', входящие в выражение (12.16) являются постоянными, так как их значения при изменении тормозного момента, приложенного к валу двигателя (нагрузки), остаются практически неизменными. Считаем постоянным (стабильным) напряжение на обмотке фазы статора U_1 и частоту f_1. Переменной величиной является скольжение S, которое может изменяться от $-\infty$ до $+\infty$. Максимальное значение момента M_{max}, развиваемото двигателем, принято называть критическим. Соответствующее ему скольжение (S_k) также называется критическим. Из математики известно, что для нахождения экстремума функции для определения S_k необходимо решить уравнение вида $dM/ds = 0$, подставив в него $M(s)$ по (12.16).

Решение этого уравнения дает

$$S_k = \pm R_2' \Big/ \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \,. \tag{12.17}$$

Подставив значение (12.17) в (12.16) получим выражение максимального момента

$$M_{max} = \pm \frac{m_1 U_1^2 p}{4 f_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]} . \tag{12.18}$$

В выражениях (12.17) и (12.18) знаки $\pm$ означают, что максимум момента может иметь место при $S > 0$ в двигательном режиме или в режиме противовключения и при $S<0$ в генераторном режиме.

Обычно активное сопротивление обмотки статора R_1 меньше суммы индуктивных сопротивлений: $R_1 \ll (x_1 + x_2')$. Поэтому можно получить упрощенное выражение критического скольжения

$$S_{кр} \approx \pm R_2^1 / (x_1 + x_2^1) , \tag{12.19}$$

и максимального момента

$$M_{max} = \pm (m_1 U_1^2 p) / \left[2\pi f_1 (x_1 + x_2') \right]. \tag{12.20}$$

12.9. Механическая характеристика

На рис.12.9 показана механическая характеристика асинхронной машины $M = f(S)$ при $U = \text{const}$.

На этой характеристике показаны все три режима асинхронной машины. Но, как указывалось выше, асинхронная машина чаще всего используется в качестве двигателя.

При скольжении $S = 1$, ротор асинхронного двигателя неподвижный $n_2 = 0$. Если в формулу (12.16) подставить $S = 1$, то получим значение пускового момента $M_п$

$$M_п = (m_1 U_1^2 R_2^1 p)/\{2\pi f_1[(R_1+R_2^1)^2 + (x_1 + x_2^1)]\} \qquad (12.23)$$

Под действием момента $M_п$ ротор начинает вращаться, скольжение — уменьшается от $S = 1$ до S_k, а момент от точки Д до А. В дальнейшем скольжение продолжает уменьшаться от S_k до $S_{ном}$, а момент от точки A до $M_{ном}$ — установившегося значения момента. Величина $M_{ном}$ определяется суммой противодействующих моментов, приложенных к валу двигателя, момента холостого хода M_0 и полезного нагрузочного момента M_2

$$M = M_0 + M_2 = M_{ст} \qquad (12.24)$$

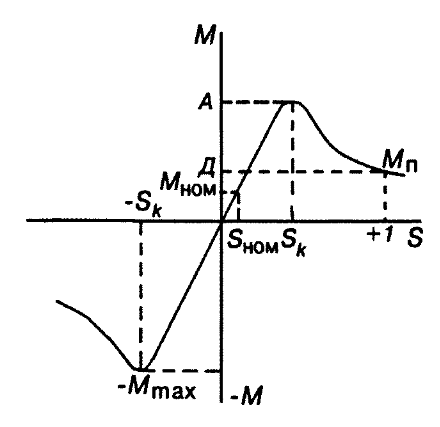


Рис. 12.9. Механическая характеристика асинхронной машины

где $M_{ст}$ — статический противодействующий момент, приложенный к валу двигателя от привода.

Статический момент $M_{ст}$ определяет величину электромагнитного момента M. При увеличении $M_{ст}$ увеличивается электромагнитный момент M Это приводит к увеличению скольжения S. Частота вращения асинхронного двигателя уменьшается.

Устойчивая работа асинхронного двигателя возможна только при скольжении меньше критического ($S < S_k$), т.е. на участке *ОА* механической характеристики. При дальнейшем увеличении скольжения ($S = S_k$) работа асинхронного двигателя становится неустойчивой. Малейшее увеличение $М_{ст}$ вызывает увеличение скольжения ($S>S_k$) и уменьшение M до скольжения $S = 1$, т.е. пока ротор двигателя не остановится. Таким образом, для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы нагрузочный момент был меньше максимального

$$M_{ст} < M_{max}$$

Поэтому вводится понятие перегрузочной способности двигателя, которая определяется как отношение $М_{max}$ к номинальному $М_{ном}$

$$\lambda = M_{max}/M_{ном} = 1,7\text{–}2,5 \qquad (12.25)$$

На участке $S < S_k$ работа асинхронного двигателя является наиболее экономичной, так как она соответствует малым значениям скольжения, а это — меньшее значение электрических потерь $P_{э2} = SP_{эм}$

12.10. Влияние питающего напряжения на работу асинхронного двигателя

Из формул (12.16), (12.18) и (12.20) видно, что электромагнитный момент, а также пусковой и максимальный пропорциональны квадрату питающего напряжения: $M = U^2$. В то же время из формулы (12.17) и (12.19) видно, что величина критического скольжения S_k не зависит от напряжения U_1. Таким образом, можно построить механические характеристики для разных напряжений (рис. 12.10).

Величина напряжения влияет на величину максимильного момента M_{max}, а также на значение перегрузочной способности двигателя

$$\lambda = M_{max}/M_{ном}$$

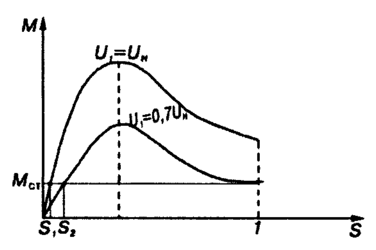


Рис. 12 . 10. Механические характеристики при различных значениях первичного напряжения

Например, вспомогательные асинхронные двигатели привода компрессоров, вентиляторов электровозов ВЛ80к, ВЛ80т, ВЛ80с получают питание от обмотки собственных нужд тягового трансформатора электровоза 380 В, при номинальном напряжении в контактной сети 25 кВ. Но, напряжение контактной сети, питающее первичную обмотку трансформатора может изменяться от 19 до 29 кВ. Тогда во вторичной обмотке тягового торансформатора напряжение будет не 380 В, а также будет изменяться от 288 до 440 В. Кратность изменения напряжения составит 440/288 = 1,52 раза. Зависимость момента от напряжения квадратичная. Следовательно изменение максимального момента составит $1,52^2 = 2,33$ раза. Ротор двигателя может остановиться, а это режим короткого замыкания. Поэтому асинхронные двигатели ЭПС применяют заведомо большей мощности. Кроме того, в электрической схеме предусмотрено переключение обмоток трансформатора на низкое напряжение, при котором изменяется коэффициент трансформации трансформатора и напряжение подаваемое на вспомогательные машины повышается. Машинист в пути следования постоянно контролирует по вольтметру величину напряжения в контактной сети.

12.11. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Для снятия рабочих характеристик вал асинхронного двигателя нагружают внешним тормозным моментом $M_{ст}$ — изменяя его величину, снимают зависимости частоты вращения n_2, КПД, полезного момента M_2, коэффициента мощности cosφ и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при U = const и f = const.

Рабочие характеристики позволяют находить все основные величины, определяющие режим работы двигателя при раз-

личных нагрузках (рис. 12.11). Характеристики снимают только для зоны практически устойчивой работы двигателя, т.е. от $S = 0$ до $S > S_{ном}$ на 10–20%.

Частота вращения ротора $n_2 = n_1(1 - S)$. Электрические потери в роторе прямо пропорциональны скольжению

$$\Delta P_{э2} = SP_{эм} \tag{12.26}$$

где $P_{эм}$ — электромагнитная мощность, Вт,

откуда

$$S = \Delta P_{э2}/P_{эм} \tag{12.27}$$

При увеличении скольжения частота вращения ротора уменьшается. Однако при переходе от режима холостого хода к режиму полной нагрузки частота вращения ротора изменяется незначительно (на 2–6%), так как при проектировании двигателей с целью уменьшения потерь мощности в роторе $\Delta P_{э2}$ стремятся, чтобы скольжение при номинальной режиме не превышало 0,02–0,06.

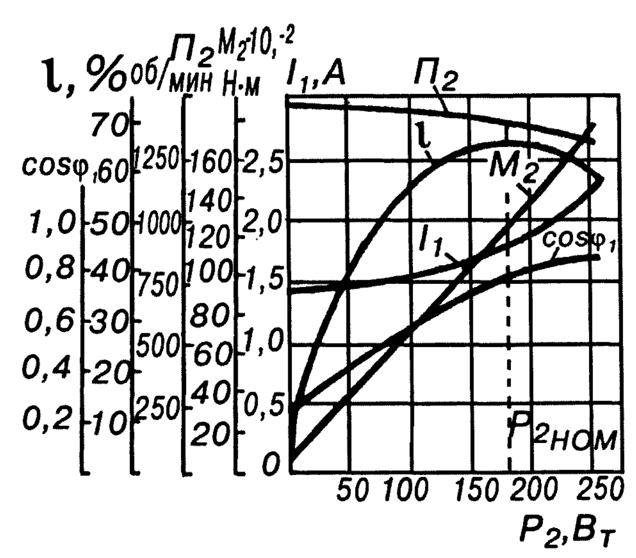


Рис. 12.11. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Зависимость $M_2 = f(P_2)$. Момент M_2 связан с полезной мощностью соотношением

$$M_2 = P_2/\omega = 60P_2/(2\pi n_2) = 9{,}55P_2/n_2 \qquad (12.28)$$

Поскольку n_2 изменяется мало, зависимость $M_2 = f(P_2)$ близка к прямолинейной.

Ток статора I_1. Активная составляющая тока пропорциональна полезной мощности, в то же время как реактивная составляющая тока, создающая основной магнитный поток почти не изменяется.

Коэффициент полезного действия КПД $\eta = f(P_2)$. Зависимость начинается с начала координат, т.к. при $P_2 = 0$, $\eta = 0$. По мере увеличения P_2 кривая КПД увеличивается и достигает максимума, а затем уменьшается. Уменьшение КПД объясняется увеличением электрических потерь, которые изменяются в квадратичной зависимости $P_{э2} = 3P_1^2R_1$

Коэффициент мощности $\cos\varphi = f(P_2)$. Реактивная составляющая тока, как указывалось выше, создает основной магнитный поток, поэтому при возрастании нагрузки практически не изменяется. Возрастает ток I_2', точнее его активная составляющая (рис. 12.12). В этом случае уменьшается угол между током I_1 и напряжением U_1, а $\cos\varphi$ увеличивается (рис. 12.11). $\cos\varphi$ при холостом ходе обычно не превышает 0,2. Асинхронные двигатели проектируют таким образом, чтобы максимум $\cos\varphi$ (обычно 0,8–0,9) соответствовал номинальной нагрузке. Поэтому для получения максима

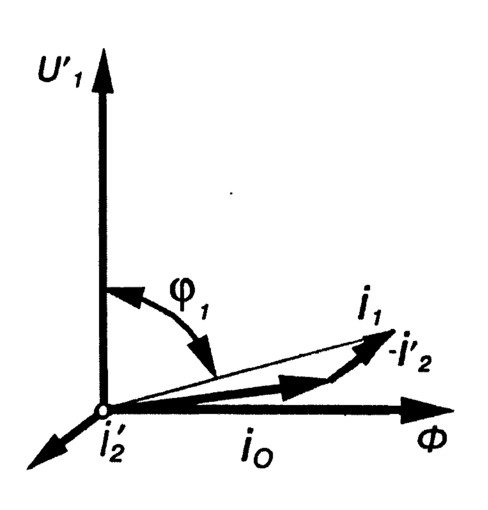


Рис. 12. 12. Векторная диаграмма асинхронного двигателя при небольшой нагрузке

льного cosφ асинхронный двигатель необходимо использовать на полную мощность. Дальнейшее увеличение нагрузки сопровождается уменьшением cosφ, так как увеличивается индуктивное сопротивление ротора (x_2S) вследствие увеличения скольжения и частоты тока в роторе.

12.12. Пуск в ход асинхронных двигателей

Как указывалось выше (см.12.5), пусковые токи не опасны для асинхронных двигателей, так как они кратковременны (составляют 1–2 с) и не успевают нагреть обмотки.Однако пусковые токи могут вызвать падение напряжения в сети. Поэтому в асинхронных двигателях мощностью свыше 38–50 кВт применяют устройства, ограничивающие пусковые токи.

При пуске практически используют следующие способы пуска:

непосредственное включение в сеть;

понижение напряжения, подводимого к обмотке статора при пуске;

подключение к обмотке ротора пускового реостата.

Прямое включение в сеть применяют для пуска в ход асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Если при пуске $M_п < M_{ст}$, то двигатель разогнаться не сможет. Отношение моментов

$$M_п / M_{ном} = K_{пм} \qquad (12.29)$$

называют *кратностью начального пускового момента*. Для двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью 0,6÷100 кВт стандартами установлено $K_{пм}$= 1,0÷2,0; мощностью 100÷1000 кВт — $K_{пм}$ = 0,7÷1,0. Увеличивать кратность пускового момента больше, чем регламентировано стандартами, нежелательно, так как связано с увеличением активного сопротивления ротора, что ухудшает энергетические показатели асинхронного двигателя.

Пусковой ток двигателя при прямом включении в сеть составляет $I_п = (4–7) I_{ном}$.

Реакторный пуск (рис 12.13, *б*) уменьшает подаваемое напряжение на двигатель. Сначала включается выключатель *S1*, и двигатель получает питание через трехфазный реактор *Р*

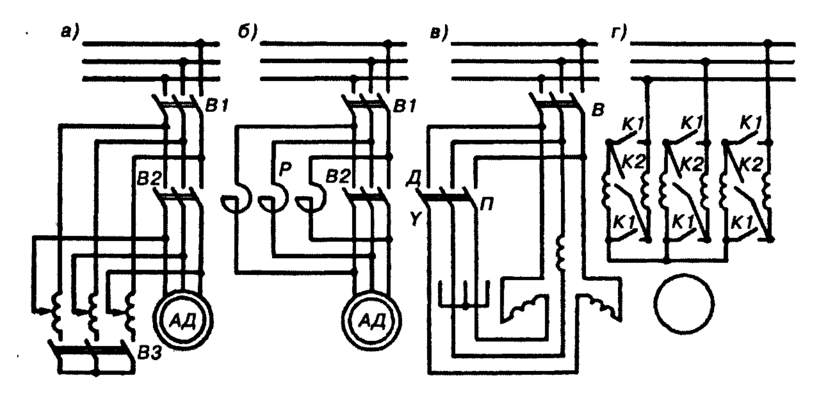


Рис. 12.13. Схемы пуска асинхронных двигателей при пониженных пусковых токах

(индуктивную катушку). На реакторе создается падение напряжения, и на двигатель поступает пониженное напряжение. Когда двигатель достигнет номинальной частоты вращения замыкают рубильник S2, который шунтирует реактор, в результате чего на двигатель подается номинальное напряжение.

Автотрансформаторный пуск осуществляют по схеме (рис. 12.13, *а*) в следующем порядке. Вначале включают выключатели *В1* и *В3*. При этом двигатель оказывается включенным на пониженное напряжение. Пусковой ток двигателя, измеренный на выходе автотрансформатора, уменьшается в *k* раз, где *k* — коэффициент трансформации. Пусковые автотрансформаторы рассчитываются на кратковременную работу и обычно имеют ответвления, соответствующие значениям вторичного напряжения равным 73, 64 и 55% от первичного.

После разгона ротора выключатель *В3* отключают и автотрансформатор превращается в реактор. Напряжение на зажимах двигателя несколько повышается, но все же будет меньше номинального. Затем включают рубильник *В2* и на двигатель подается полное номинальное напряжение.

Пуск в ход переключением со «звезды» на «треугольник» проводят по схеме (рис. 12.13, *в, г*). Применяют в случаях когда выведены все шесть концов обмотки статора и двигатель работает с соединением обмоток статора «треугольник». Например, в сети 380 В, а двигатель с соединением Y/Δ , 660/ 380 В.

Большее линейное напряжение (660 В) подается на двигатель с соединением обмоток «звезда», а меньшее линейное напряжение (380 В) — с соединением обмоток «треугольник».

При пуске обмотка статора соединена «звездой», а при достижении номинальной частоты вращения обмотку статора переключают в положение «треугольник». При этом, напряжение фаз обмоток уменьшается в $\sqrt{3}$ раза; пусковой момент уменьшается в $(\sqrt{3})^2 = 3$ раза, пусковой ток в фазах обмотки уменьшается в $\sqrt{3}$ раза, а в сети в $\sqrt{3} \times \sqrt{3} = 3$ раза.

Пуск в ход асинхронных двигателей с фазным ротором с помощью пускового реастата (рис. 12.14, *а*) увеличивает активное сопротивление ротора, что приводит к увеличению величины пускового момента (12.23), максимальный момент не изменяется. Однако при увеличении $R_п$ увеличивается $S_{кр}$ (12.15) и (12.17). Происходит сдвиг максимума момента (рис. 12.14, *б*). Каждой ступени пускового реостата соответствует своя характеристика $M(S)$. При $R^1_{2п} = R^1_2 + R_п = x_1 + x^1_2$ пусковой момент момент равен максимальному. При $R^1_2 > x_1 + x^1_2$ пусковой момент уменьшается. В начальный момент пуска (первая ступень пускового реостата) пусковой момент равен M_{max}. По мере разгона ротора скольжение и пусковой момент уменьшаются по кривой *1*. При уменьшении момента до значения $M_{п\,min,}$ пусковой реостат переключают на вторую ступень, уменьшая его

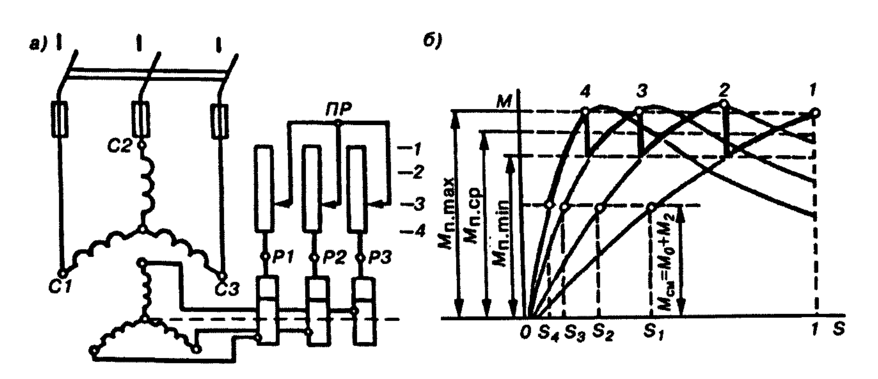


Рис. 12.14. Схема включения пускового реостата (а) *и построение графка пускового момента* (о) *асинхронного двигателя с фазным ротором*

сопротивление. В этом случае скольжение и момент изменяются по кривой 2 и при достижении пускового момента $M_{п\,min}$ вновь переключают пусковой реостат на третью, затем и на четвертую ступень (кривые *3* и *4*). Четвертая ступень соответствует полностью выведенному пусковому реостату — ротор будет закорочен и работает как короткозамкнутый. При достижении электромагнитным моментом значения статического момента $M_{ст}$, частота вращения достигнет установившегося значения и процесс пуска будет закончен.

По условиям нагрева реостаты рассчитывают на кратковременное включение. По конструкции пусковые реостаты бывают проволочные, с литыми чугунными элементами, а также жидкостные. Мощные металлические реостаты для охлаждения опускают в бак с трансформаторным маслом. Металлические реостаты выполняют ступенчатыми. Переключение с одной ступени на другую осуществляют либо вручную с помощью рукоятки контроллера, либо автоматически с помощью контакторов или с электрическим приводом. Жидкостной реостат представляет собой сосуд с электролитом, в который опущены электроды. Сопротивление реостата регулируют путем изменения глубины погружения электродов.

В асинхронных двигателях с фазным ротором обеспечивается наиболее благоприятные соотношения между пусковым моментом и пусковым током: максимальный пусковой момент при небольшом пусковом токе.

12.13. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей

Частота вращения ротора асихронного двигателя определяется формулой

$$n = 60f(1 - S)/p,$$

из которой следует, что возможны три способа регулирования частоты вращения асинхронных двигателей: изменением частоты f питающего напряжения, числа пар полюсов p и величины скольжения S.

12.13.1. Регулирование частоты вращения изменением числа пар полюсов

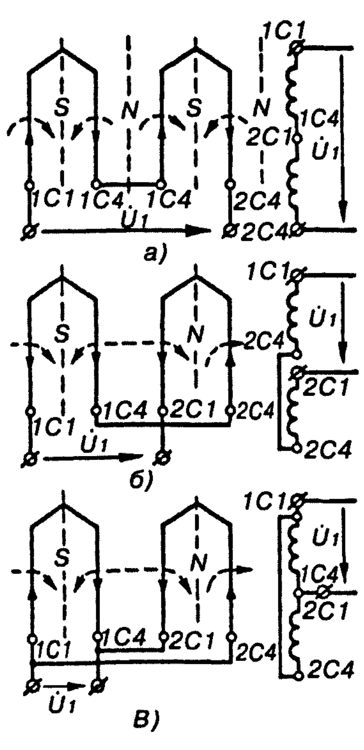


Рис. 12.15. Принципиальные схемы включения секций одной фазы обмотки статора, обеспечипающие изменение числа пар полюсов

Этот способ используется для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором. Изменение числа пар полюсов производится путем переключения обмотки статора. При этом число пар полюсов короткозамкнутого ротора изменяется автоматически. Так как *p* может быть только целым числом, то данный способ обеспечивает ступенчатое регулирование частоты вращения. Так при частоте 50 Гц и $p = 1$–4 пар полюсов можно получить следующие синхронные частоты вращения: 3000, 1500, 1000, 750 об/мин.

Для изменения числа пар полюсов необходимо, чтобы в пазы статора были уложены независимые обмотки с различными значениями *p*, либо при одной обмотке статора имелась бы возможность изменения ее схемы соединений. В первом случае заметно увеличиваются габариты и массы двигателей, но при этом возможно практически любое соотношние чисел пар полюсов обмоток. Как правило, такие двигатели выполняются с двумя обмотками с соотношением чисел пар полюсов от 3:1 до 12:1.

Переключение обмоток статора с четырехполюсной в двухполюсную показано на рис. 12.15.

Две последовательно соединенные катушки образуют четыре полюса (рис. 12.15, *а*). Если катушки соединить последовательно, но

встречно, то получим два полюса (рис. 12.15, *б*). При параллельном соединении катушек (рис. 12.15, *в*) — тоже получаем два полюса. В обоих случаях частота вращения одинакова, однако условия работы двигателя и его характеристики различны.

Мощность для каждой схемы:

$P = 3U_1 I_{1н} \cos\varphi_I$ (рис. 12.16, *а*)

$P = 3U_1 I_{1Н} \cos\varphi_{II_1}$ (рис. 12.16, *б*)

$P = 3U_1 2I_{1Н} \cos\varphi_{II_2}$ (рис. 12.16, *в*)

Из полученных выражений следует, что при переходе от схемы (рис. 12.15, *а*), к последовательному соединению встречно включенных секций по схеме (рис. 12.15, *б*) допустимая мощность на валу двигателя остается неизменной $P_{1доп} = P_{11доп}$ ($\cos\varphi_I = \cos\varphi_{I_I}$), тогда как при переходе к параллельному соединению встречно включенных секций по схеме рис. 12.15, *в*. Эта мощность практически удваивается $P_{11доп} = 2P_{1доп}$ ($\cos\varphi_{II_2} \approx \cos\varphi_I$). При этом допустимый момент на валу двигателя $M_{доп} = 9{,}55P_{доп}/n$ в первом случае с увеличением частоты вращения уменьшается вдвое $M_{II1доп} = 0{,}5M_{Iдоп}$, а во втором случае остается неизменным $M_{II2доп} = M_{1доп}$.

Указанный способ применяется в двигателях с короткозамкнутым ротором. При применении двигателя с фазным ротором необходимо и на роторе применить полюсно переключаемую обмотку, что значительно усложняет двигатель.

12.13.2. Регулирование частоты вращения изменением скольжения

Изменение скольжения происходит только в нагруженном дигателе. В режиме холостого хода скольжение, а следовательно, и частота вращения остаются практически неизменными.

В двигателях с фазным ротором изменяют сопротивление пускового реостата, но реостат при этом должен быть рассчитан на длительную работу.

Каждой ступени пускового реостата соответствует своя характеристика, и при заданном $M_с$ — разные значения скольжения S_1, S_2, S_3, S_4 (см. рис. 12.14).

Электрические потери в роторе пропорциональны скольжению ($P_{э2} = SP_{эм}$), большая часть которых теряется в реостате. Рост потерь сопровождается ухудшением условий вентиляции из-за снижения частоты вращения, что вызывает перегрев двигателя.

12.13.3. Регулирование скольжения изменением подводимого напряжения

При уменьшении подводимого напряжения электромагнитный момент двигателя изменяется пропорционально U^2 и соответственно изменяются механические характеристики (см. рис. 12.16, *б*), в результате чего изменяются также значения рабочих скольжений S_1 и S_2. Диапазон регулирования частоты вращения ограничен значением критического скольжения и возможной утратой двигателя перегрузочной способности, которая пропорциональна квадрату напряжения сети. Подводимое напряжение чаще всего регулируют автотрансформатором, иногда реактором.

12.13.4. Регулирование скольжения нарушением симметрии подводимого напряжения

Если нарушить симметрию подводимого напряжения, то вращающееся поле статора станет эллиптическим. При этом поле приобретает обратную составляющую, которая создает свой момент $M_{обр}$, направленный встречно вращающему моменту. Результирующий момент M станет равным разности моментов $M = M_{пр} - M_{обр}$. В итоге получаем зону регулирования частоты вращения (рис. 12.16, *а*), расположенную между характеристикой при симметричном напряжении

(кривая *1*) и характеристикой при однофазном питании двигателя (кривая 2).

Схема получения несимметричного напряжения для питания асинхронного двигателя (рис. 12.16, *б*), содержит однофазный автотрансформатор, который включают в одну из фаз. Уменьшая напряжение увеличиваем несимметрию и уменьшаем частоту вращения.

Обычно этот способ регулирования применяют лишь в двигателях малой мощности.

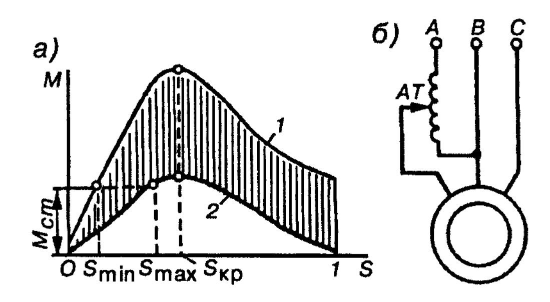


Рис. 12.16. Механические характеристики (а) и схема включения (б) асинхронного двигателя при регулировании частоты вращения изменением симметрии трехфазной системы

12.13.5. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением частоты тока в статоре

Этот способ регулирования частоты вращения в настоящее время находит широкое применение в ТПС.

Академиком М.П. Костенко в 1925 г. был сформулирован закон управления асинхронными двигателями при изменении частоты тока

$$U_1/U_{1ном} = (f_1/f_{1ном})\sqrt{M/M_{ном}}\,. \qquad (12.30)$$

При M = const уравнение (12.30) принимает вид

$$U_{1ном}/f_{1ном} = U_1/f_1 = \text{const}\,, \qquad (12.31)$$

т.е. питающее напряжение следует изменять прямо пропорционально его частоте. При этом мощность двигателя увеличивается прямо пропорционально возрастанию частоты вращения.

При необходимости поддерживают постоянной мощность электродвигателя $P = M\omega = \text{const}$, так как частота вращения пропорциональна частоте f_1, то получим условие

$$M_{\text{ном}} f_{1\text{ном}} = M f_1 = \text{const} \tag{12.32}$$

Из указанных зависимостей следует, что асинхронный двигатель может быть использован в качестве тягового как на ЭПС так и на тепловозах и дизель-поездах.

12.14. Однофазные асинхронные двигатели

В тех случаях, когда источником электроэнергии является однофазный ток применяют однофазные асинхронные двигатели.

Ротор однофазного двигателя имеет короткозамкнутую обмотку, как и у трехфазного, а на статоре расположена однофазная обмотка. Однофазный двигатель можно получить из трехфазного, если одну фазу отключить, а две другие соединить последовательно или параллельно. Однофазным током питаются трехфазные вспомогательные машины новых электровозов, таких как, например, ЭП1.

Рассмотрим процессы, протекающие в однофазном асинхронном двигателе.

Однофазный ток I_1 статора однофазного двигателя создает не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле с амплитудой Φ_{max} ,изменяющееся от $+\Phi_{max}$ до $-\Phi_{max}$. Пульсирующее магнитное поле можно разложить на два магнитных потока $\Phi_{\text{пр}}$ и $\Phi_{\text{обр}}$, вращающиеся в противоположных направлениях (рис. 12.17). Каждый из этих потоков создает в роторе свой вращающий момент. Результирующий вращающий момент будет равен нулю.

Если, однако, ротор приведен во вращение в ту или иную сторону, то один из моментов будет преобладать, развивая вращающий момент. Это присходит от того, что составляющая магнитного потока, вращающаяся в том же направлении (прямом), будет иметь относительно ротора частоту

$$n_{\text{пр}} = n_1 - n_2 = n_1 - n_1(1 - S) = S n_1 \, . \tag{12.33}$$

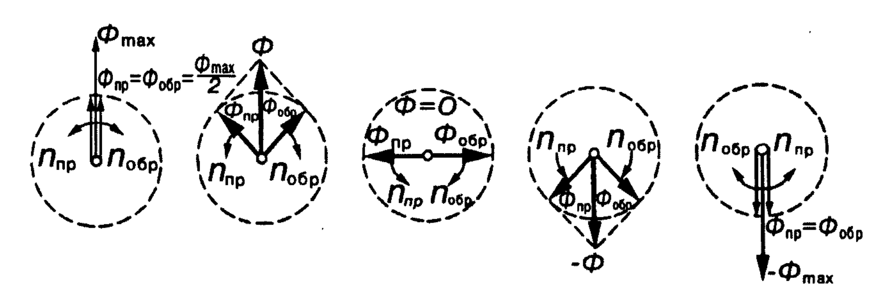


Рис. 12.17. Разложение пульсирующего магнитного потока Ф на два вращающихся

Составляющая магнитного потока, вращающаяся в противоположном направлении (обратном) с частотой вращения

$$n_{пр} = n_1 + n_2 = n_1 + n_1(1 - S) = n_1(2 - S) \; . \qquad (12.34)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора току $I_{2обр}$ многократно превышает ее активное сопротивление. Следовательно ток $I_{2обр}$ будет почти чисто индуктивным, оказывая размагничивающее действие на обратную составляющую магнитного потока $\Phi_{обр}$, ослабляя его.

Результирующий вращающий момент $M_р$ двигателя равен разности моментов, создаваемых прямым и обратным магнитными потоками

$$M_р = M_{пр} + M_{обр} \qquad (12.35)$$

Таким образом, при вращении ротора результирующий момент не равен нулю, т.е. двигатель развивает вращающий момент. При $M_р > M_{ст}$, двигатель достигнет определенной установившейся частоты вращения. Оба направления вращения двигателя равноценны, и тормозной режим работы отсутствует. При одинаковых габаритах номинальная мощность однофазного двигателя состовляет не более 50–70% от номинальной мощности трехфазного двигателя. Это связано с тем, что обмотка статора однофазного двигателя занимает не все пазы и имеется обратное поле, которое уменьшает вращающий момент, увеличивая потери двигателя и вызывая дополнительный нагрев.

Трехфазный двигатель будет работать в режиме однофазного двигателя, если произойдет обрыв одной фазы цепи статора.

При использовании трехфазного асинхронного двигателя в качестве однофазного может быть применена любая из схем включения (рис. 12.18). Напряжение сети подводят к началам двух фаз. К началу третьей фазы и одному из сетевых зажимов присоединяют фазосдвигающий элемент (активное, индуктивное или емкостное сопротивления), который будет создавать сдвиг фаз между токами обмоток. Наибольший угол сдвига фаз (близкий к 90°) создает конденсатор (рис. 12.19). Если после пуска фазосдвигающий элемент от сети не отключают, то его называют *рабочим*. При использовании фазосдвигающего элемента только во время пуска (при работе — отключен), то его

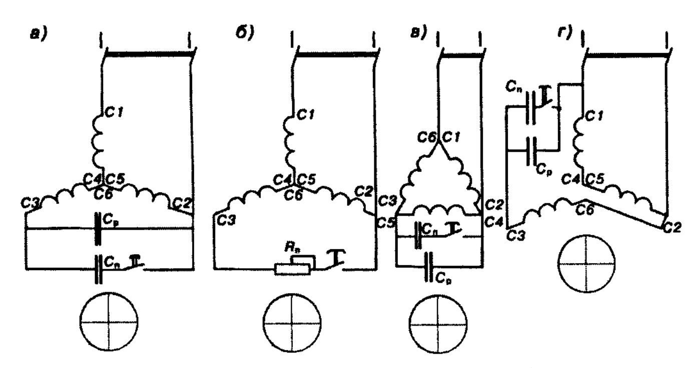


Рис. 12.18. Схемы включения трехфазных асинхронных двигателей в однофазную сеть

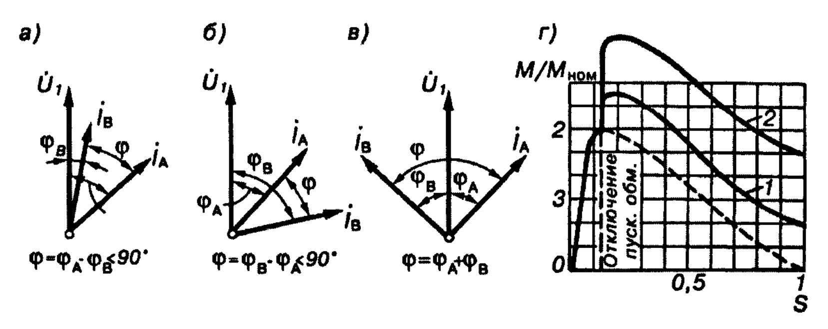


Рис. 12 .19. Сравнение свойств фазосдвигающих элементов:

а — активное сопротивление; б — индуктивность; в — емкость; г — механическая храктеристика двигателя при различных фазосдвигающих элементов; 1 — активное сопротивление; 2 — емкость

называют пусковым. Как указывалось выше, наиболее часто используют конденсатор.

Если пуск двигателя происходит без нагрузки, то пусковой конденсатор не используют, так как его применяют для увеличения пускового момента.

Реверсирование производят путем переключения сетевого провода с одного зажима конденсатора на другой.

Рабочая емкость пропорциональна мощности двигателя (номинальному току) и обратно пропорциональна напряжению для схемы (рис.12.18, *а*)

$$C_р = 2800 I_{ном} / U_1, \text{ (мкФ)}; \tag{12.35}$$

для схемы (рис. 12.18, *б*)

$$R_п = 22 / P_н ; \tag{12.36}$$

для схемы (рис.12.18, *в*)

$$C_р = 4800 I_{ном} / U_1 ; \tag{12.37}$$

для схемы (рис.12.18, *г*)

$$C = 2700 I_{ном} / U_1 . \tag{12.38}$$

За номинальный ток и напряжение принимают фазные значения величин, указанных в паспорте электродвигателя, при условии, что двигатель включается и работает на полную мощность.

В качестве рабочих могут применяться конденсаторы типов КБГ-МН (конденсатор бумажный, герметичный, в металлическом корпусе, нормальный), БГТ (бумажный, герметичный, термостойкий), МБГЧ (металлобумажный, герметичный, частотный).

При определении пусковой емкости исходят из пускового момента. Если пуск двигателя происходит без нагрузки, то пусковой емкости не требуется. Чтобы получить пусковой момент, близкий к номинальному, достаточно иметь пусковую емкость, определяемую соотношением

$$C_п = (2{,}5–3) C_р . \tag{12.39}$$

Отключаемые (пусковые) конденсаторы работают несколько секунд, поэтому иногда используют более дешевые электролитические конденсаторы типа ЭП.

Номинальное напряжение конденсаторов типов КБГ-МН и БГТ дается для работы на постоянном токе. При их использовании на переменном токе следует уменьшить, примерно, в два раза допустимое рабочее напряжение. Например, на конденсаторе указано напряжение 1000 В, в этом случае конденсатор включают в сеть переменного напряжения до 500 В.

При ремонте и после каждого отключения конденсатор разряжают с помощью какого-либо стержня. На электровозе конденсаторы разряжают заземляющей штангой.

В качестве проводников активных пусковых сапротивлений используют фехраль, нихром и другие материалы, а в качестве изоляторов цилиндры из керамических материалов.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия асинхронного дигателя?
2. Почему асинхронный двигатель называют асинхронным?
3. Какими способами подключают асинхронные двигатели к трехфазной сети ?
4. Каково устройство асинхронного двигателя ?
5. Каковы режимы работы асинхронных машин?
6. От каких параметров зависит величина электромагнитного момента асинхронного двигателя?
7. Почему максимальный момент больше у асинхронного генератора?
8. Чем опасно для работы асинхронного двигателя понижение напряжения в сети?
9. В каких случаях ограничивают пусковые токи?
10. Назовите способы ограничения пусковых токов
11. От каких параметров зависит частота вращения асинхронного двигателя?
12. Почему однофазный двигатель не развивает пускового момента?

Глава 13.

Конструктивные решения тяговых электродвигателей переменного тока

13.1. Общие сведения

Коллекторные ТЭД, имея высокие технико-экономические показатели, обладают существенными недостатками. Это, в первую очередь, относится к коллекторно-щеточному узлу, на обслуживание которого затрачиваются значительные средства. Мощность свыше 1200 кВт на одну ось коллекторными двигателями реализовать невозможно.

Из бесколлекторных ТЭД применяют асинхронные и вентильные.

Вентильные тяговые электродвигатели (ВТЭД) занимают промежуточное положение между двигателями постоянного тока и синхронными двигателями.

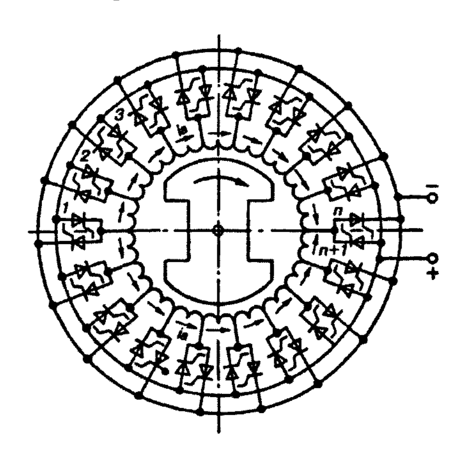


Рис. 13.1. Схема вентильного двигателя с замкнутой обмоткой якоря

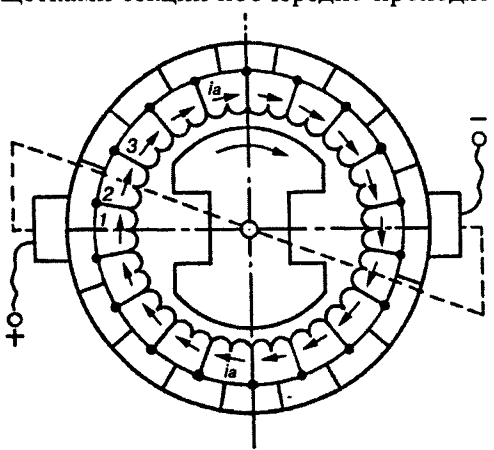
С появлением и широким внедрением полупроводниковой техники появилась возможность заменить коллекторно-щеточный узел полупроводниковым коммутатором (рис. 13.1).

В этом двигателе главные полюсы с обмотками возбуждения расположены на роторе, а обмотка якоря — на статоре, т.е. двигатель выполнен обращенной конструкции.

В двигателе постоянного тока секции присоединяют к петушкам коллекторных

пластин, а в вентильном двигателе — через сдвоенный управляемый тиристорный ключ непосредственно к сети постоянного тока.

На рис. 13.2 показана обращенная конструкция двигателя постоянного тока. Коллектор этого двигателя неподвижен, а щетки механически соединены с валом машины и вращаются вместе с ротором. Здесь же показаны направления токов в секциях якоря. При повороте полюсов со щетками секции поочередно проходят в зону действия полюса другой полярности, т.е. в другую параллельную ветвь. В коммутируемых секциях соответственно изменяется направление тока. А в вентильном двигателе (рис 13.1) необходимо от-крывать тиристоры, имеющие то же положение, что и щетки (рис. 13.2). Для момента времени (рис. 13.1) ток в обмотку якоря поступает через тиристоры *1* и *n*. Остальные вентили закрыты. Если поворачивать ротор с полюсами, секция *1* перейдет в зону действия другого полюса, а тиристоры *1* и *n* закрываются. Открываются тиристоры *2* и *n+1* и т.д. В итоге получаем такое же распределение токов в обмотке якоря как и у коллекторного двигателя.



13.2. Схема обращенного двигателя постоянного тока

Для того, чтобы поочередно открывать управляемые вентили-тиристоры, в зависимости от положения главных полюсов ротора, предусмотрено специальное устройство — датчик положения.

В общем случае датчик положения состоит из возбудителя, соединенного непосредственно с валом двигателя, и чувствительных элементов, создающих сигнал при определенных положениях возбудителя. Сигнал подает команду на переключение тиристоров. Датчики положения ротора могут быть электронными, лучевыми, магнитными и др.

13.2. Вентильные тяговые электродвигатели

В вентильных тяговых электродвигателях уменьшают количество секций и применяют разомкнутую обмотку якоря — многофазную. Наиболее часто применяют трехфазную (рис 13.3, *а*). На роторе располагаются обмотка возбуждения (ОВР), которая получает питание от источника постоянного тока. Обмотка статора (якоря), выводы которой *А*, *В*, *С*, подключена к трехфазному тиристорному мосту с тиристорами *V1–V6*. Тиристорный мост подключен к источнику постоянного тока. Для снижения пульсаций потребляемого тока в эту же цепь включен сглаживающий реактор *СР*.

Открытием тиристоров в соответствии с диаграммой (рис. 13.3, *б*) получается вращающееся магнитное поле статора.

На ЭПС переменного тока применяют схемы с явновыраженным звеном постоянного тока ЯЗПТ (рис. 13.4, *б*) и с неявновыраженным звеном постоянного тока НЯЗПТ (рис. 13. 4, *а*).

Напряжение от контактной сети поступает на первичную обмотку тягового трансформатора *Т*, где оно уменьшается до определенной величины (рис. 13.4, *б*), а со вторичной обмотки — подается на тиристорный выпрямитель *В1* и после сглаживания реактором *L* поступает на инвертор *И*, который преобразует постоянный ток в трехфазный с регулируемой частотой тока. С инвертора *И* напряжение подается на вентильный двигатель *М*.

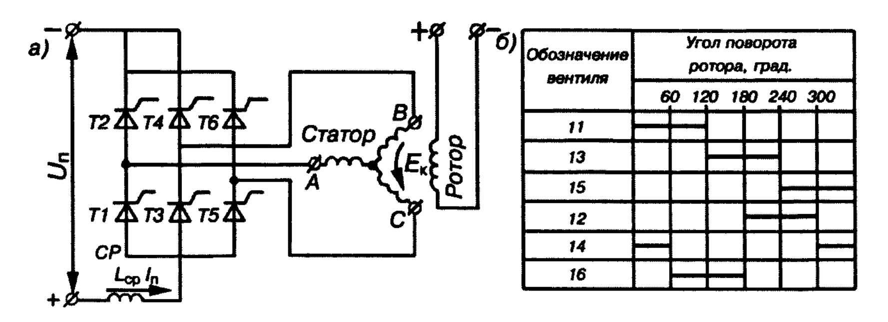


Рис. 13.3. Схема вентильного двигателя со звеном посеянного тока

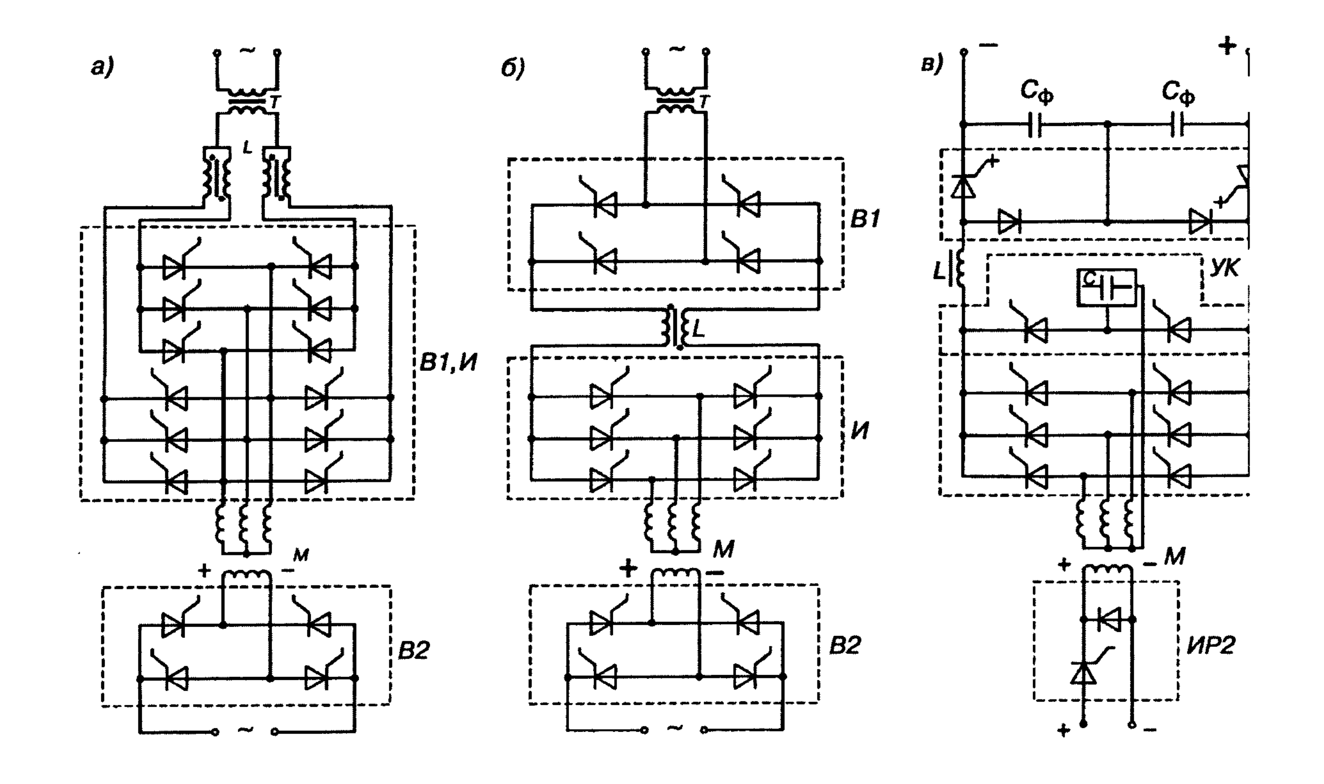


Рис. 13.4. Принципиальные схемы ВТЭД электровозов переменного (а, б) и постоянного (в) тока

На обмотку возбуждения ротора напряжение подается через тиристорный выпрямительный мост *В2*.

Схема питания вентильного двигателя с НЯЗПТ позволяет осуществлять поочередное питание выводов обмотки двигателя с одновременным выпрямлением и преобразо-ванием частоты питающего напряжения.Более высокий КПД также получается в схеме с НЯЗПТ.

На опытных грузовых электровозах переменного тока ВЛ80^{В}–661 и ВЛ80^{В}–1189 применялись системы с НЯЗПТ (см. рис. 13.4, а). Система с ЯЗПТ использована на пассажирском электровозе ЭП200 выпуска 1997г (рис. 13.4, *б*).

На ЭПС постояннного тока применяется система с НЯЗПТ (рис. 13.4, *в*). Она использована на электровозе ЭП100. Характеристики асинхронных и вентильных ТЭД такие же как у коллекторных двигателей постоянного тока. Эти хактеристики искусственные, так как их получают с помощью инверторов.

Конструкция вентильного тягового электродвигателя. Конструктивно ВТЭД НТВ-1000 (рис. 13.5) представляет собой синхронную трехфазную неявнополюсную машину с обмоткой возбуждения *5*, расположенную на роторе и получающей питание

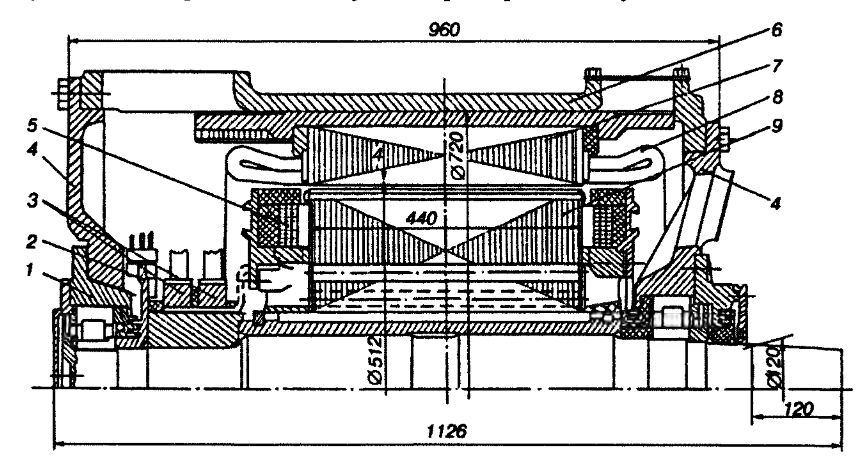


Рис. 13.5. Продольный разрез конструкции ВТЭД НТВ-1000:

1 — капсула подшипника; 2 — устройство датчиков; 3 — контактные кольца; 4 — щиты поодшипниковые; 5 — обмотка ротора; 6 — остов; 7 — статор; 8 — обмотка статора; 9 — ротор

через щетки и контактные кольца *3* от источника постоянного тока.

В остов *6* запрессован сердечник *7* статора, выполненный из отдельных пластин электротехнической стали. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена обмотка статора, которая, как правило, выполняется петлевой двухслойной из жестких шаблонных многовитковых катушек, закрепляемых в пазах изоляционными клиньями.

Неявнополюсные и явнополюсные исполнения ротора имеют свои достоинства и недостатки.

При явнополюсном исполнении ротора за счет формы полюсного наконечника можно получить практически синусоидальные изменения магнитной индукции в воздушном зазоре. Но при импульсном питании обмоток статора через инвертор напряжение несинусоидально, поэтому форма полюсного наконечника не имеет существенного значения. Это позволяет выполнить катушки возбуждения по типу полюсных катушек машин постоянного тока. В собраном роторе боковые стороны катушек должны быть надежно закреплены, обычно клиньями с болтовым зажатием для избежания деформации от действия центробежных сил. Это ухудшает условия охлаждения катушек. Чем меньше полюсов имеет ротор, тем больше величина магнитного потока на полюс, что приводит к увеличению количества витков в катушке и увеличению сечения самого полюса. Высокоскоростной ВТЭД при двух- и четырехполюсном исполнении выполнить невозможно.

При неявнополюсном исполнении можно надежно закрепить катушки возбуждения клиньями, а лобовые катушки — бандажами. Улучшаются условия охлаждения, т.к. каждый виток обмотки имеет прямой контакт со стенкой паза, а в сердечнике выполняют аксиальные каналы.

Сердечник неявнополюсного ротора (рис. 13.6) выполняют из листовой конструкционной стали толщиной 1–2 мм. В сердечнике сделаны пазы *1* прямоугольной формы с углублением для клиньев. В каронках зубцов дополнительно выполняют отверстия *2* круглой или прямоугольной формы для размещения стержней успокоительной демпферной обмотки. Иногда пазы под обмотку выполняют параллельными друг другу в пределах полюсного деления (рис. 13.6, *б*). Такое исполнение более технологично, т.к.

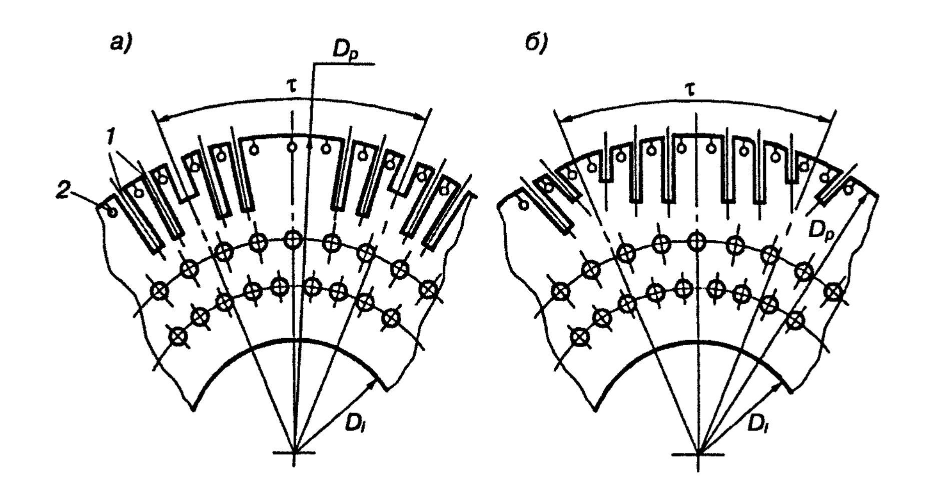


Рис. 13.6. Эскизы исполнения листов ротора неянополюсного ВТЭД

позволяет укладывать обмотку ротора из заранее изолированных катушек,что позволяет повысить надежность изоляции обмотки.

На вал ротора напресовывают втулку *18* (рис 13.7), на который собирается сердечник ротора *12* и закрепляется обмоткодержателями *9*. Между обмоткодержателями и основными листами сердечника *12* устанавливают листы *17*, выполненые из медного листового проката толщиной 1,5–2 мм. В верхней части сердечника уложена успокоительная (демпферная) обмотка *10*, выполненая из твердого или латунного профиля, которая затем надежно сваривается с крайними медными листами, образуя короткозамкнутую обмотку. В пазах сердечника укладывают обмотку возбуждения *14*, которая выполнена из прямоугольного медного изолированного провода марки ПЭТВСДЕ или ППИПК. Пазы ротора изолируют гильзой из листового теплостойкого материала (изофлекс или пленкосинтокартон), а иногда при необходимости и пленкой из полиамида.

Поверхности обмоткодержателей *9* изолируются стеклотканью *15* с послойной промазкой компаундом на эпоксидной смоле ЭД-16 или путем наложения полос из стеклослюдинитовой пленки толщиной 0,13–0,15мм.

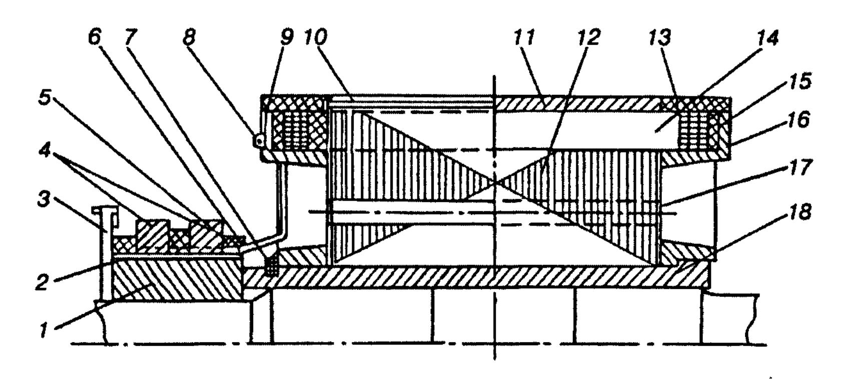


Рис. 13.7, Конструкция ротора ВТЭД:

1 — корпус; 2, 15 — изоляция; 3 — диск датчиков положения ротора; 4 — контактные кольца; 5 — выводы колец; 6, 13 — бандаж; 7 — гайка; 8 — балансировочный груз; 9 — обмоткодержатель; 10 — успокоительная (демпферная) обмотка; 11 — клинья; 12 — сердечник ротора; 14— обмотка возбуждения; 16 — гайка; 17 — листы, выполненные из медного листового проката, толщиной 1,5–2 мм; 18 — втулка

Катушку возбуждения закрепляют в пазах клиньями из алюминиевого специального профиля 11, а лобовые части - бандажом 13 и стеклолентой на эпоксидном связующем.

Концы обмоток возбуждения соединены последовательно перемычками из такого же провода и изолируются. Два вывода обмоток возбуждения подключены к контактным кольцам *4*, выполненным из стали. Кольца *4* от корпуса *1* изолированы формовочным теплостойким миканитом *2*. Промежутки между кольцами *4* и по краям корпуса *1* покрыты бандажом *6* и стеклолентой. В собранном состоянии ротор пропитывают в эпоксидном компаунде ЭМТ-1 (для класса F) или лаке КО 916К (для класса Н).

Для динамической балансировки ротора в торцевых стенках обмоткодержателей выполнены пазы для установки и крепления балансировочных грузов *8*.

На вал ротора напрессован диск *3* датчика положения ротора, причем вырезы и выступы на диске датчиков строго ориентированы относительно осей ротора.

13.3. Асинхронные тяговые электродвигатели

13.3.1. Общие сведения

В асинхронном тяговом электродвигателе (АТЭД) с короткозамкнутым ротором отсутствует всякий скользящий контакт, в то время как в вентильном ТЭД имеются контактные кольца и щетки для питания постоянным током обмоток возбуждения.

Но, для АТЭД присущи ряд недостатков, о которых указывалось выше (см. гл. 12). Первые асинхронные и вентильные ТЭД появились в СССР в 1968 году. За рубежом подобные локомотивы появились в 80-х годах. В приложении приведены страны и фирмы изготовители локомотивов с бесколекторными ТЭД.

АТЭД, как и коллекторные, по конструкции бывают двух типов корпусные и безкорпусные.

Рассмотрим вначале корпусную конструкцию. Корпус выполняют из цельной стальной отливки или сварным. Он имеет две цилиндрические поверхности: под посадку подшипниковых щитов; внутреннюю цилиндрическую поверхность для посадки сердечника статора. Кроме того, на корпусе располагают площадки для установки коробки выводов, кронштейна для подвешивания двигателя, приливы для крепления корпусов зубчатой передачи.

Сердечник *1* статора (рис. 13.8) выполняют из тонколистовой стали электротехнической стали, марки 2212, толщиной 0,5 мм. По торцам сердечника размещены листы выполненные из конструкционной стали толщиной 1 мм, соединенные между собой точечной электросваркой. Весь пакет с обоих торцов зажат жесткими боковинами *3* в виде колец, выполненных из толстолистовой стали толщиной 20–25 мм. Сквозь сердечник и боковины выштампованы аксиальные вентиляционные каналы. По наружной поверхности сердечника расположены шесть накладных пластин -стяжек с выступами *4*, которые укладывают в специальные аксиальные пазы и сваренные в монолитную конструкцию. Для предотвращения «распушения» листов сердечника статора крайние листы *2* (рис. 13.8, *б*) делают ступенчатыми. Иногда применяют установку пальцев (рис. 13.8, *в*), выполненных из прямоугольного или из ступенчатого двухтаврового сечения.

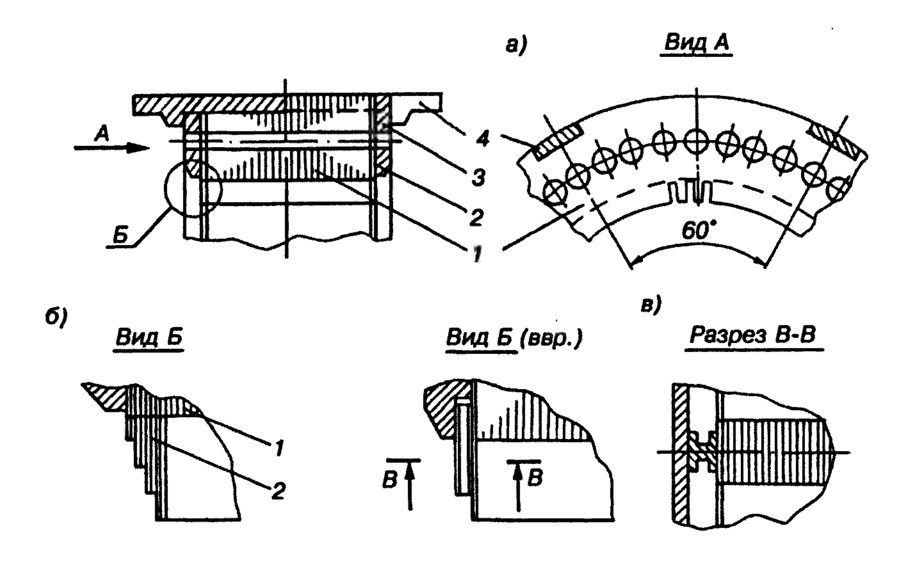


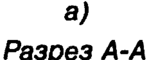
Рис. 13.8. Статор корпусного исполнения:

1 — листы статора; 2 — крайние листы; 3 — боковины; 4 — стержни-стяжки

В последнее время появилась тенденция выполнения бескорпусных статоров. Бескорпусное исполнение статоров применяют при опорно-рамном подвешивании АТЭД. В этом случае статор не нагружен усилиями силовой передачи.

При бескорпусном статоре (рис. 13.9) шихтованный сердечник *3* размещают между двумя полукорпусами *1* и *2*. Снаружи сердечника расположены стержни продольной жесткости *4*, изготовленные из толстолистового проката или кованной заготовки. Стержни могут быть прямоугольной или трапециидальной формы типа «ласточкин хвост».

Полукорпуса и сердечник сжимаются определенным усилием, поэтому стержни *4* приваривают к полукорпусам и к сердечнику без снятия сжимающих усилий. Образуется цельная конструкция. Обмотку статора применяют простую петлевую. Волновые обмотки используют реже из-за большого количества паеных соединений, которые приходится изолировать вручную. Изоляция класса H и F



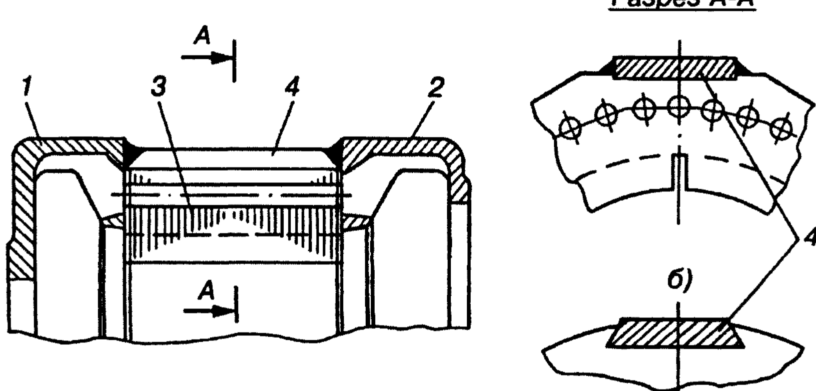


Рис. 13.9. Статор бескорпусного исполнения:

1, 2 — полукорпусы; 3 — листы статора; 4 — стержни продольной жесткости

В АТЭД применяют роторы с короткозамнутой обмоткой. Сердечник выполняют из отдельных листов электротехнической стали марки 2212 толщиной 0,5 мм.

В сердечнике выполнены пазы, формы которых показаны на рис. 13.10. В пазы ротора заливают расплавленный алюминий или укладывают неизолированные медные стержни *7* (рис. 13.11). На выступающие концы стержней надевают медные короткозамкнутые кольца *8* и сваривают или пропаивают. На медные кольца с определенным натягом насаживают бандажные кольца

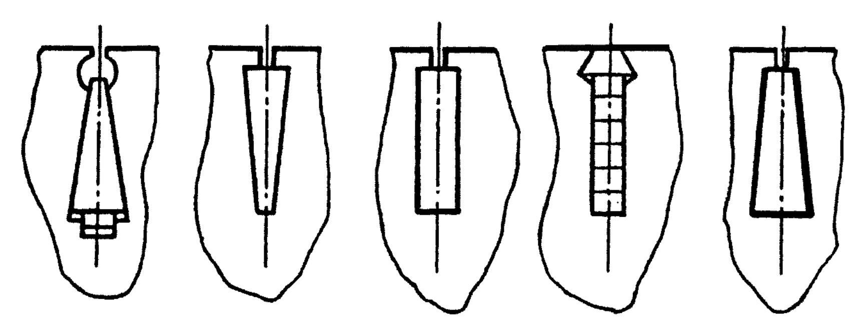


Рис. 13.10. Конструкции пазов ротора АТЭД

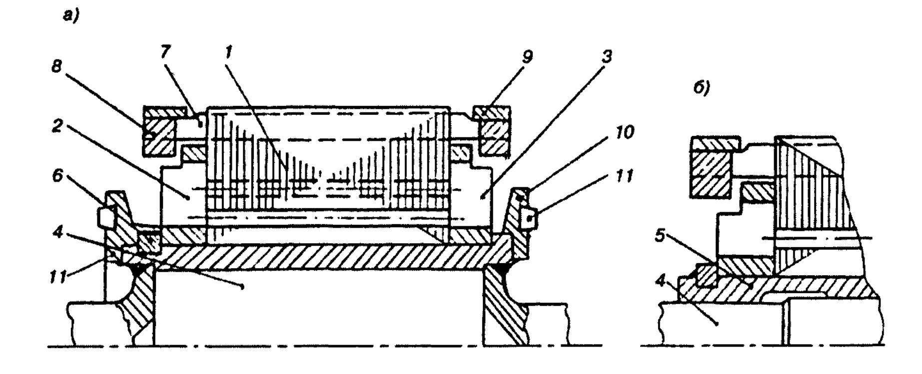


Рис. 13.11. Конструкция ротора АТЭД:

1 — сердечник; 2, 3 — нажимные шайбы; 4 — вал; 5 — втулка; 6 — шпонка; 7 — стержни обмотки; 8 — короткозамкнутые кольца ; 9 — бандажные кольца; 10,11 — специальные диски; 12 — дополнительные грузы для динамической балансировки

9, выполненые из высокопрочной немагнитной стали или из берилевой бронзы.

Сердечник *12* собирают на втулке *5*, которую напрессовывают на вал *4*. С торцов сердечник зажат нажимными шайбами *2* и *3*.

Для динамической балансировки ротора предусмотрены специальные диски, на которых закреплены дополнительные грузы *12*.

Окончательно собранный ротор пропитывают жаростойким кремнийорганическим лаком.

13.3.2. Тяговый электродвигатель ДАТ-305

На Брянском машиностроительном заводе произведена модернизация тепловоза ТЭМ *2* с электрической передачей. В процессе модернизации коллекторные тяговые двигатели замены на асинхронные. В дальнейшем планируется освоить изготовление маневровых тепловозов с асинхронными ТЭД.

АТЭД выполнен корпусным с опорно-осевым подвешиванием. Корпус *7* (рис. 13.12) выполнен цилиндрическим и изготовлен из низкоуглеродистой стали марки 09Г2С.

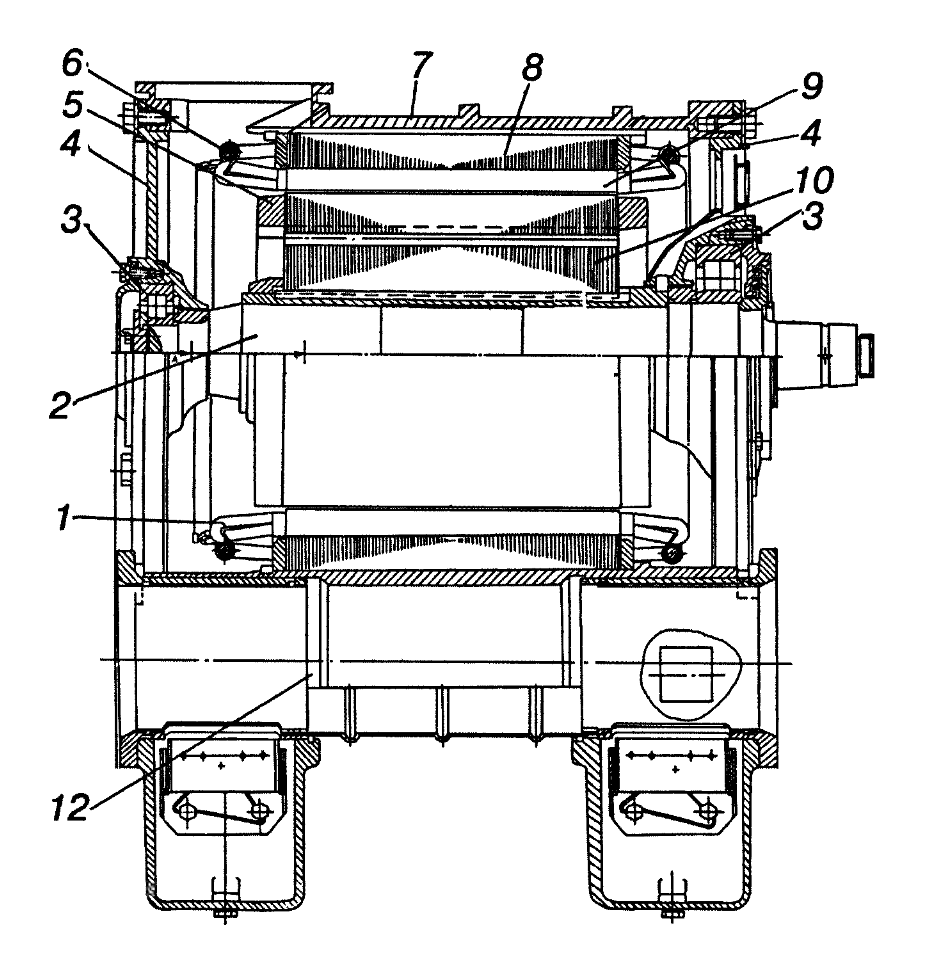


Рис. 13.12. Асинхронный тяговый электродвигатель ДАТ-305:

1 — обмотка статора; 2 — вал; 3 — подшипники; 4 — подшипниковые щиты; 5 — кольцо обмотки ротора; 6 — бандажное кольцо; 7 — корпус; 8 — сердечник статора; 9 — пазы сердечника статора; 10 — сердечник ротора; 11 — вентиляционные каналы ротора; 12 — коробка выводов

С торцов корпус закрыт подшипниковыми щитами *4*. Охлаждающий воздух через окно в корпусе подается внутрь двигателя и нагретый возращается наружу через жалюзи на окнах подшипникового щита со стороны привода. В корпус запресован сердечник статора *8*, изготовленный из отдельных пластин электротехнической стали, толщиной 0,5 мм. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена трехфазная обмотка *1* статора. Корпусная изоляция обмотки выполнена из полиамидной пленки и стеклоленты, пропитанной лаком КО-916К. Лобовые части статорной обмотки закреплены бандажными кольцами *6*, которые предотвращают деформацию лобовых частей от вибрации. Изоляция обмотки статора класса Н.

Ротор состоит из вала *2*, сердечника *10*, короткозамкнутой обмотки *5*. Вал изготовлен из проката стали марки 30ХМА с термообработкой. На вал напрессована втулка, на которую собирают сердечник из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. В сердечнике ротора выполнены полузакрытые пазы, куда заливают алюминий и которые при застывании скрепляются кольцами *5*. Свободный конец вала для посадки шестерни имеет конусность 1:10 и отверстия для маслосъема. В сердечнике ротора выполнены два ряда оксиальных каналов *11* для вентиляции.

Обмотка статора соединена «звездой» и концы обмотки выведены в коробку выводов *12*. Маркировка выводов обмотки следующая: *U* — начало первой фазы; *V* — начало второй фазы; *W* — начало третьей фазы.

Концы фаз соединены внутри двигателя. Датчик частоты вращения установлен с противоположной стороны от выступающего конца вала.

Основные технические данные АТЭД ДАТ-305

Мощность, кВт 305
Напряжение линейное, В 675/ 1000
Ток фазы, А 320/195
Частота вращения, об/мин 313/2230
Момент на валу Н×м 9316
Климат исполнения .... УХЛ 1
КПД, % 91

Расход охлаждающего воздуха м/с 0,8
Полное давление охлаждающего воздуха, Па 1500
Максимальный момент на валу при трогании с места,Н×м 9770
Мощность в тормозном режиме, кВт 350

Контрольные вопросы

1. Какие преимущества имеют бесколлекторные ТЭД по сравнению с коллекторными?
2. Каковы отличия вентильного ТЭД от коллекторного ? от синхронного двигателя?
3. От каких параметров зависит частота вращения вентильного ТЭД? асинхронного ТЭД?

Глава 14.

Вспомогательные и специальные машины переменного тока

14.1. Общие сведения

На ТПС применяют следующие вспомогательные машины переменного тока:

расщепители фаз (электровозы и электропоезда переменного тока);

мотор-компрессоры;

мотор-вентиляторы;

мотор-насосы;

синхронные генераторы управления, (электровоз ВЛ82м);

синхронные возбудители;

двухмашинные агрегаты, состоящие из двигателя постоянного тока и синхронного генератора.

Обычно момент сопротивления на валу двигателя привода вспомогательных машин изменяется незначительно и поэтому частота вращения изменяется мало.

Общая мощность вспомогательных машин электровозов постоянного тока составляет до 3–5% общей мощности тяговых двигателей, а у электровозов переменного тока до 7–10% мощности тяговых электродвигателей или до 10% электрической энергии затрачиваемой на тягу.

Вспомогательные электрические машины ТПС можно классифицировать по способам питания электрической энергией и охлаждения, по роду тока, по степени защиты, по климатическому исполнению и др.

По способу монтажа вспомогательные машины подразделяют на горизонтальные установки на лапах или фланцевые, вертикальные установки, с креплением к основанию (фундаменту) жестко или посредством эластичных элементов-амортизаторов.

Чаще всего вспомогательные машины размещают в кузове ТПС, где уровень вибрации ниже, чем на ТЭД. Вибрации достигают ускорений 10м/с^2 в диапозоне частот 1–100 Гц.

Хотя вспомогательные машины располагают в кузове на них тоже воздействуют пыль и влага. Работающее оборудование

выделяет тепло, поэтому возможно превышение температуры воздуха в кузове над температурой наружного воздуха на 15–20°. В этом случае температура воздуха в летнее время может достигнуть +60⁰С, зимой она может снижаться для зоны умеренного климата до –50⁰С, а для зон холодного климата — даже до –60⁰С, относительная влажность воздуха при температуре +25⁰С может повышаться до 98%.

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором на электровозах переменного тока питаются несимметричным трехфазным напряжением, которое может изменяться от 265 до 455 В, при номинальном линейном напряжении 380 В. Его форма отличается от синусоидальной.

Как указывалось выше, вращающий момент асинхронного двигателя существенно зависит от напряжения на его зажимах. При уменьшении напряжения в $\sqrt{2}$ раз, момент уменьшается в два раза. Если выбрать двигатели без запаса мощности, то при снижении напряжения в контактной сети до 19 кВ они остановятся. Вследствии этого мощность всех вспомогательных машин примерно в два раза больше, чем это необходимо для привода механизмов при номинальной мощности.

Кроме того,несимметрия напряжений вызывает неравенство фазовых токов двигателя и сдвиг их на угол, не равный 120°. Неравномерность нагрузки фаз двигателя приводит к повышенному нагреванию той обмотки по которой протекает наибольший ток, что ограничивает мощность машины.

14.2. Расщепитель фаз

Расщепители фаз могут быть как синхронные так и асинхронные. Наибольшее распространение получили асинхронные расщепители фаз.

Принцип преобразования однофазного тока в трехфазный с помощью расщепителя фаз основан на свойстве вращающегося магнитного поля индуцировать в трехфазной статорной обмотке ЭДС, которая также будет трехфазной.

Асинхронный расщепитель фаз представляет собой асинхронную машину, выполняющию одновременно функцию однофазного двигателя и трехфазного генератора (принцип действия однофазного двигателя приведен в главе 12). Обмотка статора

представлят собой несимметричную звезду с неодинаковым числом пазов на полюс и фазу, но с равным числом витков в катушечных группах. Две фазы звезды *С1–М1* и М–С2 (рис. 14.1) составляют двигательную обмотку, третья фаза *С3–С4* — генераторную.

Двигательная обмотка подключена к обмотке собственных нужд тягового трансформатора и предназначена для приведения во вращение машины. Генераторная обмотка создает третью фазу и подключена к двигательной обмотке, но не в нулевой точке *М*, а в точке обеспечивающей наилучшую симметрию напряжений.

При включении двигательных обмоток расщепителя на однофазное напряжение трансформатора замыкают контактор *К* и генераторная обмотка получает питание по цепи, проходящей через пусковой резистор *R*.

По двигательной обмотке протекает однофазный ток и в магнитной системе машины создается магнитный поток, но как указывалось выше, в однофазном двигателе, создается не вращающееся, а пульсирующее магнитное поле. Для получения сдвига фаз между токами двигательной и генераторной обмотками (генераторная обмотка при пуске в ход выполняет функцию пусковой), включают активное сопротивление. Ток генераторной обмотки оказывается сдвинутым по фазе на некоторый угол по сравнению с током в двигательных обмотках и этого сдвига оказывается достаточно для разгона расщепителя без нагрузки при отключенных вспомогательных двигателях. Когда частота вращения ротора достигнет 1430 об/мин срабатывает

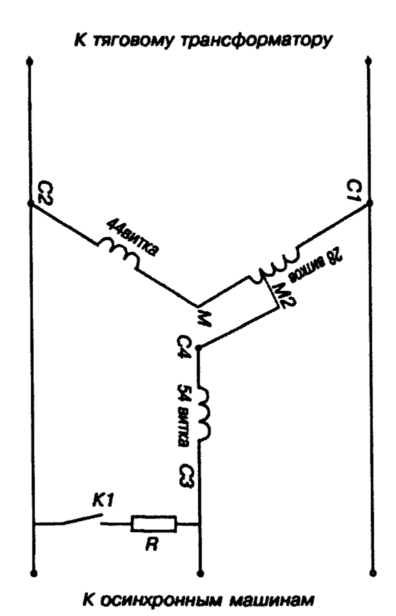


Рис. 14.1. Схема соединения обмоток статора расщепителя фаз НБ-455

реле оборотов и отключит контактор К. После отключения контактора расщепитель фаз работает как однофазный асинхронный двигатель на холостом ходу. Вращающееся магнитное поле, созданное двигательной обмоткой и ротором, пересекает витки генераторной обмотки, наводя в ней ЭДС. Так как генераторная обмотка сдвинута в пространстве относительно двигательных обмоток на угол 120^{0}, то ЭДС генераторной обмотки будет сдвинута на этот же угол. Напряжение генераторной и двигательной обмоток образует трехфазную систему,к которой подключают трехфазные асинхронные вспомогательные машины. При симметричной нагрузке от генераторной фазы расщепителя потребляется 1/3 всей мощности вспомогательных машин. При несимметричной нагрузке линейные токи трехфазной системы различны. Суммарная же мощность нагрузки в этом случае равна сумме мощностей трех фаз.

Чтобы обеспечить симметрию трехфазного напряжения при несимметричных падениях напряжения в отдельных фазах обмотку статора выполняют несимметричной с разным количеством витков. Так обмотка C_2M имеет 44 витка; *С3С4* — 54 витка; *С1М* — 32 витка; *С1М2* — 28 витков. Генераторную обмотку подключают к точке, соответствующей наилучшей симметрии напряжения на выходе расщепителя фаз при определенной нагрузке. Характеристики расщепителей фаз приведены в табл. 14.1.

Таблица 14.1. **Характеристики расщепителей фаз**

Показатель	Расщепитель фаз типа		
	НБ-453	НБ-455А	РФ-1Д5
Серия ЭПС	$ВЛ60^к$	$ВЛ80^к$, $ВЛ80^с$, $ВЛ80^т$	ЭР9М, ЭР9Е
Номинальная мощность, кВт	115	210	28
Напряжение, В	380	380	220
Число полюсов статора	4	4	4
Частота вращения, об/мин	1490	1490	1470
Класс изоляции обмотки статора	8	8	8

Конструктивно расщепитель фаз аналогичен асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором.

Расщепитель фаз НБ-455 представляет собой агрегат, состоящий из расщепителя и генератора управления ДК-455 (рис. 14.2). Остов расщепителя чугунный литой. В него впрессован сердечник *3*, выполненный из отдельных листов электротехнической стали. В сердечнике выполнены пазы, куда уложена трехфазная

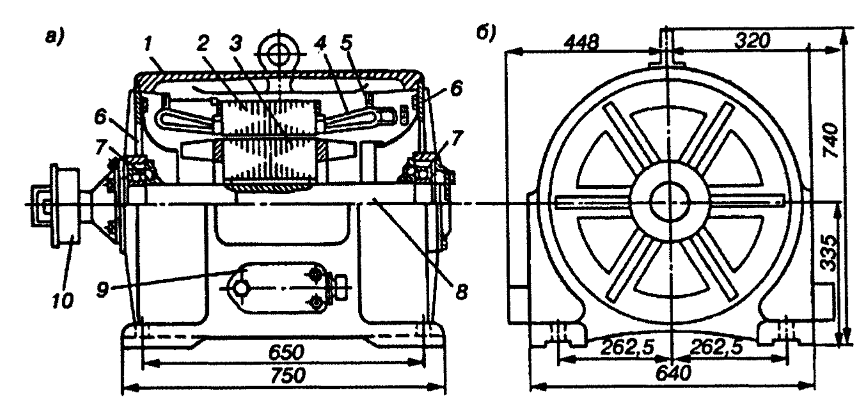


Рис. *14.2. Продольный разрез (а) и вид сбоку (б)* РАСЩЕПИТЕЛЯ ФАЗ НБ-455А:

1 — корпус; 2 — сердечник статора; 3 — ротор; 4 — *обмотка статора; 5 — бандажное кольцо; 6 —щит подшипниковый; 7 — якорный подшипник; 8 — вал; 9 — коробка выводов; 10 — реле оборотов*

обмотка *5*, с изоляцией класса В. На вал ротора напрессован сердечник также выполненный из отдельных листов электротехнической стали. В пазах сердечника находится алюминиевое «беличье колесо». Вал ротора опирается на подшипники, помещенные в щиты *2*. На одном конце вала установлено реле оборотов *1*, на другом, удлиненном — генератор управления.

Расщепитель НБ-455А имеет более длинный вал, так как на нем расположен генератор управления. В остальном его конструкция не отличается от расщепителя фаз НБ-455А.

Расщепитель фаз РД-1Д5 (рис. 14.3) питается напряжением 220 В, которое подводится к фазам *А* и *С*. При пуске между фазами *А* и *В* включается пусковой резистор с сопротивлением 0,42 Ом, который отключается после разгона. Остов — литой, стальной (рис. 14.4), имеет четыре выступа для крепления расщепителя под кузовом вагона. В остов запрессован сердечник *1*,

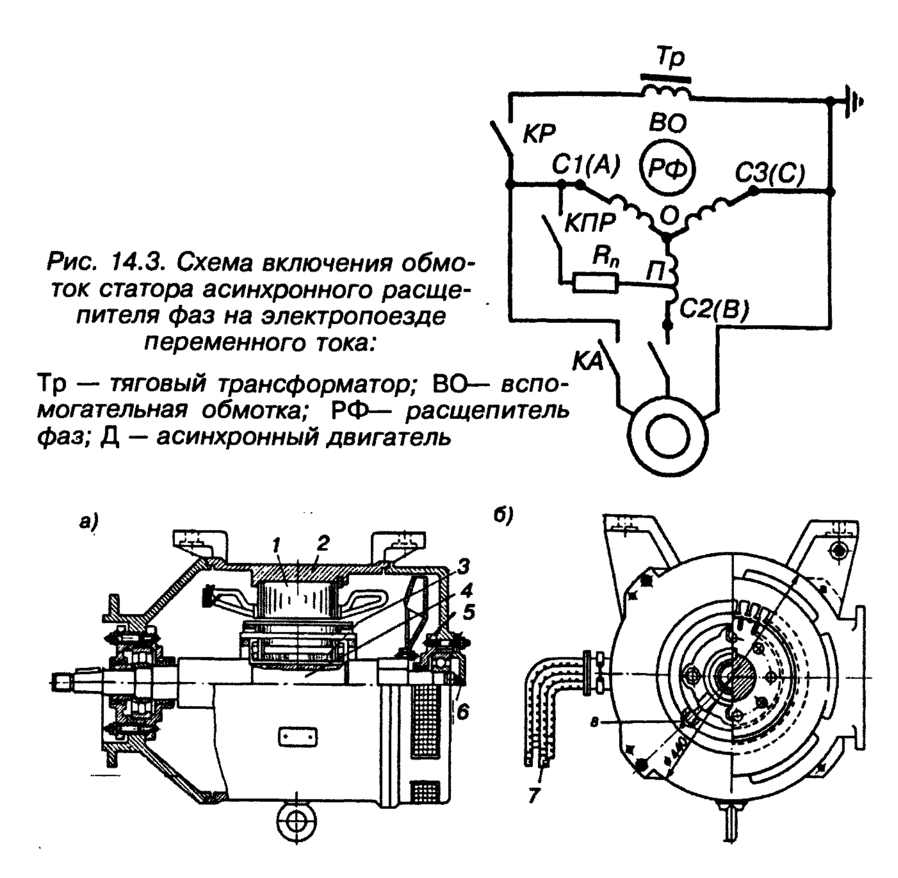


Рис. 14.3. Схема включения обмоток статора асинхронного расщепителя фаз на электропоезде переменного тока:

Тр — *тяговый трансформатор;* ВО— *вспомогательная обмотка;* РФ— *расщепитель фаз; Д — асинхронный двигатель*

Рис. 14.4. Расщепитель фаз РФ-1Д:

а — вид спереди; б — вид сбоку; 1 — сердечник статора; 2 — остов; 3 — сердечник ротора; 4 — вал; 5, 6 — крышки; 7 — выводы; 8 — масленка

дополнительно закрепленный шестью шпонками и набранный из отдельных листов горячекатанной электротехнической стали, толщиной 0,5 мм. Листы изолированы лаком. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена трехфазная обмотка и закреплена текстолитовыми клиньями. Лобовые части переплетают стеклолентой. Катушки между собой изолируют стеклоэскапоновой лакотканью и электрокартоном, а между фазами — гибким миканитом.

Статор с обмотками пропитывают в термореактивном лаке с высокой температурой запечки.

Сердечник ротора набирают из отдельных пластин горячекатанной стали толщиной 0,5 мм и закрепляют на валу с обеих сторон нажимными шайбами. В листах имеются круглые отверстия для вентиляции ротора и пазы для короткозамкнутой обмотки. Обмотка ротора двойная. Стержни беличьей клетки выполнены из меди и алюминия и соединяются между собой кольцвми. Верхняя беличья клетка пусковая, нижняя — рабочая.

На вал ротора напрессовывают втулку. К ней болтами крепят центробежный вентилятор. Охлаждающий воздух проходит через вентиляционный патрубок, машину и выбрасывается через специальные люки в заднем подшипниковом щите.

Передний подшипниковый щит усилительный. Это вызвано установкой рабочего вентиляционного рабочего колеса для систем вентиляции выпрямительной установки и сглаживающего реактора.

14.3. Асинхронный двигатель привода компресоров

Приводом компрессоров, вентиляторов и насосов ЭПС переменного тока отечественного производства являются асинхронные двигатели тягового исполнения: АС81-6, АП81-4, АП82-4, АС82-4, АЭ-92-402, АОСВ72-6, ДОЖ 42-2, АОМ42-2, АОМ32-4. Буквы и цифры означают: А — асинхроный; П — повышенный пусковой момент; С — повышенное скольжение; О — обдуваемый; Д — двигатель; Ж — железнодорожный; Э — электровозный; М — морской; В — со специальным валом. Первая цифра после букв указывает номер диаметра статора, вторая — номер длины статора, третья — число полюсов.

Остов двигателя (чаще всего) чугунный литой, иногда сварной (рис. 14.5). В остове закрепляют сердечник, набранный из листов электротехнической стали. Листы сердечника либо окисидированы, либо покрыты лаком. В пазы сердечника укладывают трехфазную обмотку, иногда однослойную, но чаще всего двухслойную петлевую. Изоляция обмотки двигателей

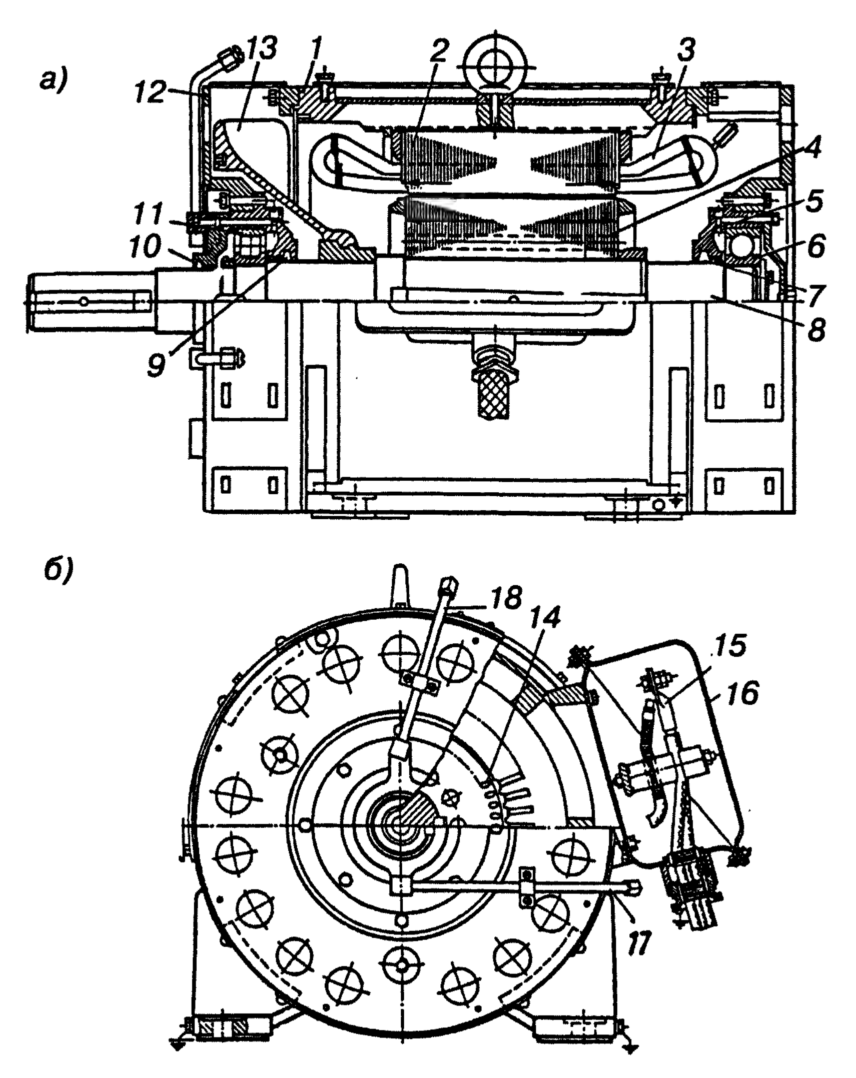


Рис. 14.5. Продольный (а) к поперечный (б) разрезы электродвигателя АЭ92-4:

1 — корпус; 2 — статор; 3 — обмотка статора; 4 — ротор; 5 — крышка внутренняя; 6, 11 — подшипник; 7, 9, 10 — уплотнения; 8 — вал; 12 — щит подшипниковый; 13 — вентилятор; 14 — стержень ротора; 15 — вывод; 16 — коробка выводов; 17, 18 — маслопроводы

АП-82-4, АС-81-6, АС-82-4 и АО-63-2 класса В, а АЭ-92-4 и АЭ-92-6 класса Н. Подшипниковые щиты двигателей стальные. Для смазки подшипников имеется маслопровод.

Характеристики асинхронных двигателей ЭПС приведены в табл. 14.2

Таблица 14.2. **Характеристики асинхронных двигателей ЭПС**

Показатель	Тип электродвигателя				
	АП-82-4	АЭ-92-402	548А	АОСВ-72-6	АС-81-6
Серия ЭПС	ВЛ60^к	ВЛ80^т ВЛ80^с ВЛ80^р	ЭР9М ЭР9Р	ЭР9П	ВЛ60^к
Мощность, кВт	55	40	5	14	25
Номинальное напряжение, В	380	380	220/ 380	220/380	380
Частота вращения, об/мин	990	1425	975	900	925
КПД, %	90,5	85,5	80	80	84
Масса, кг	400	400	310	447	360

Сердечник ротора, также как и статор, выполнен из отдельных листов электротехнической стали. В сердечнике сделаны пазы, куда заливают сплав, состоящий из 96% силумина и 4% меди. Короткозамкнутые кольца, находящиеся с обеих сторон ротора, отлиты вместе с вентиляционными лопатками. Вал ротора вращается в двух шарнирных подшипниках. Внутри двигателя воздух охлаждает передние лобовые части обмотки статора, затем разделяется на два параллельных потока: первый проходит между наружной поверхностью сердечника статора и обшивкой корпуса, второй — через вентиляционные отверстия сердечника ротора. На корпусе имеется коробка выводов и рим-болт для подъема двигателя.

14.4. Электронасос

На электровозах и электропоездах переменного тока применяют электронасосы, предназначенные для перекачивания трансформаторного масла в системе охлаждения тягового трансформатора.

Технические данные электронасосов приведены в табл. 14.3.

Таблица 14.3.

Показатель	АТТ-63/10	2ТТ-16/10
Серия ЭПС	ВЛ80^т ВЛ80^с	ЭР9Е ЭР9М
Подача, м^3/ч	63	16
Напор, м	10	10
Режим работы	Продолжительный	
Потребляемая мощность, кВт	2,2	0,82
Напряжение сети, В	220/380	220/380
Частота, Гц	50	50
Номинальный ток, А	12,9/7,5	3,5/2,0
КПД, %	55	45
Частота вращения, об/мии	1410	2900
Масса, кг	105	55

Электронасосы монтируют в одном блоке с тяговом трансформатором. Электронасос состоит из трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором и одноступенчатого центробежного насоса, размещенного в одном корпусе (рис. 14.6). Вал ротора опирается на подшипники *8*, расположенные в переднем *7* и задним *17* подшипниковых щитах.

Со стороны всасывающего патрубка 1, на консольной части вала закреплено рабочее колесо 4. Оно крепится с помощью гайки 2, стопорной шайбы 3 и шпонки.

Сердечник 11 статора запресован в корпус 10 электронасоса. На внутренней поверхности сердечника выполнены пазы, куда уложена трехфазная обмотка, концы которой присоеденены к клеммам, расположенным в коробке 13. На наружной поверхности статора расположен направляющий аппарат 5. Сверху на корпусе электронасоса имеется пробка 6.

Фланцем всасывающего патрубка электронасос крепят к корпусу трансформатора. Нагнетательный патрубок крепится к фланцу маслопровода.

При вращении ротора электронасоса масло из бака трансформатора поступает на рабочее колесо, а оттуда через каналы аппарата 5 на лопатки корпуса, которые выпрямляют закрученный поток масла и направляют его в сторону

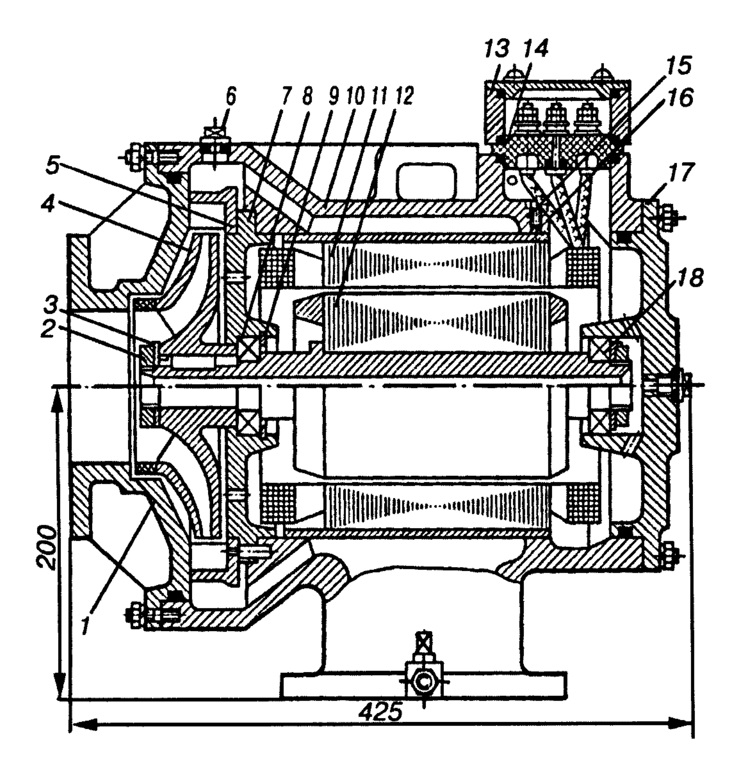


Рис. 14.6. Продольный (о) разрез электронасоса 4ТТ-63/10:

1 — патрубок всасывающий; 2 — гайка; 3 — шайба стопорная; 4 — колесо рабочее; 5 — аппарат направляющий; 6 — пробка; 7, 17 — подшипниковые щиты; 10 — корпус; 11 — статор; 12 — ротор; 13 — коробка выводов; 14 — выводы; 15 — болт заземления; 16 — винт стопорной

нагнетательного патрубка. Масло омывает лобовые части статора, смазывает подшипники и через отверстия в валу и обтекатель возвращается во всасывающую полость рабочего колеса. Такая циркуляция масла обеспечивает отвод тепла.

Электронасос выполнен герметичным, полностью исключается утечка масла во внешнюю среду. Корпус насоса, всасывающий патрубок, направляющий аппарат и рабочее колесо отлиты из чугуна.

Обмотка статора — двухслойная петлевая, катушечная, выполнена проводом ПСД 1,16 и пропитана лаком.

Изоляцией паза является гибкий стекломиканит толщиной 0,25 мм и два слоя стеклоткани толщиной 0,15 мм.

14.5. Возбудитель ВС-650

Возбудитель (рис. 14.7) предназначен для питания переменным током (через выпрямитель) обмотку возбуждения тягового генератора. Он представляет собой однофазный синхронный генератор защищенного исполнения.

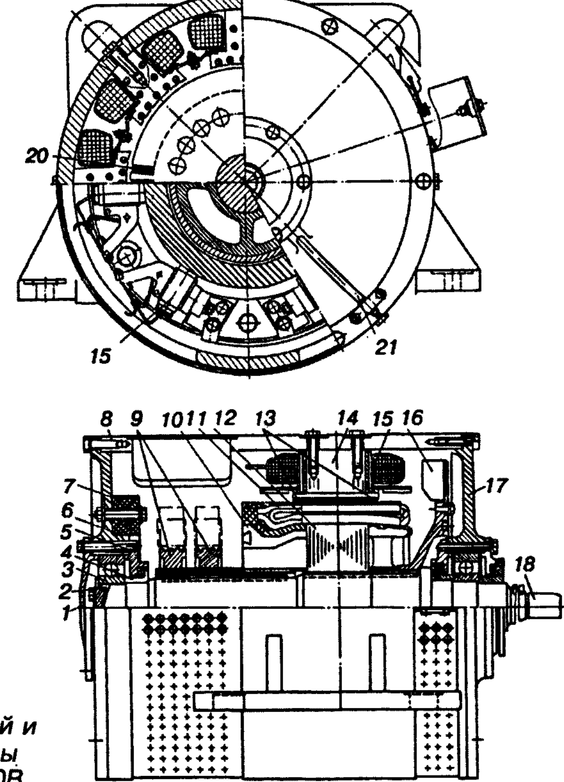


Рис. 14.7. Продольный и поперечный разрезы возбудителя ВС-650В

Технические данные возбудителя:

Род тока .... Переменный
Мощность, кВт 26
Напряжение, В 287
Ток, А 146
Частота вращения, об/мин 3300
Класс изоляции .... В

Статор состоит из станины *8*, изготовленной из толстолистовой стали, полюсов *14* с обмотками возбуждения *15*, подшипниковых щитов *6* и *17*, щеткодержателей со щетками.

Сердечники полюсов собирают из листовой стали, спрессовывают и стягивают заклепками. В полюсные наконечники встроена демферная обмотка в виде медных стержней круглого и прямоугольного сечений. Катушки возбуждения соединены последовательно. Концы обмоток *U1* и *U2* выведенены в коробку выводов. Изоляция обмотки возбуждения класса F. В собранном виде сердечник полюса с катушкой возбуждения пропитывают в эпоксидном компаунде.

Якорь *10* возбудителя приводится во вращение через распределительный редуктор дизеля. Сердечник якоря собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм и напрессовывают на вал. В осевом направлении сердечник удерживается с одной стороны обмоткодержателем (со стороны свободного конца вала), и латунной втулкой с другой стороны. В сердечнике выполняют пазы куда укладывают волновую обмотку *11*. Обмотка укреплена на сердечнике посредством стеклобандажей *13*. Выводы обмотки с помощью двух контактных шпилек соединены с контактными кольцами *9*, которые напрессовывают на вал через изоляционный слой и латунную втулку. Контактные кольца изготовляют из антикоррозионной стали.

Вал якоря опирается на подшипники *3*, установленные в подшипниковых щитах *6* и *17*. Подшипники закрыты с обеих сторон крышками *1* и *5* с лабиринтными уплотнениями. Смазку в подшипники добавляют через маслопроводящие трубки *21*.

Щеткодержатели *19* крепятся на пластмассовой траверсе *7* и соединяются токосборными шинами с отводами, идущими в коробку выводов. Маркировка выводов *C1* и *C2*.

14.6. Синхронный подвозбудител ВС652У2

Синхронный подвозбудитель предназначен для питания переменным током рабочих обмоток магнитного усилителя и трансформаторов в системе возбуждения тягового генератора и представляет собой синхронную машину обращенной конструкции (рис. 14.8).

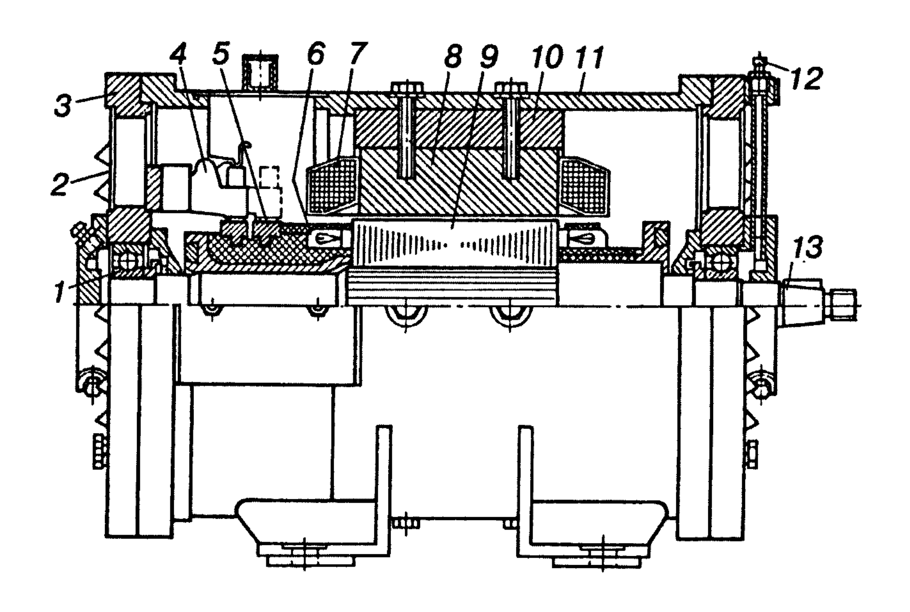


Рис. 14.8. Синхронный подвозбудитель типа ВС652:

1 — подшипник; 2 — жалюзийный щиток; 3 — подшипниковый щит; 4 — щеткодержатель; 5 — контактные кольца; 6 — обмотка; 7 — катушка возбуждения; 8 — сердечник полюса; 9 — сердечние якоря; 10 — магнитопровод; 11 — остов; 12 — масленка шариковая; 13 — вал

Технические данные:

Род тока .... Переменный
Мощность, кВт 0,55
Напряжение, В 110
Ток, А 10
Частота вращения, об/мин 4000
Класс изоляции .... В
Серия тепловозов 2ТЭ10Л,2ТЭ10В,4ТЭ10С, ТЭП60, 2М62

Корпус *11* стальной, цилиндрической формы. К внутрен — ней стороне корпуса прикреплен кольцевой магнитопровод *10* и четыре полюса, состоящие из сердечника *8* и обмотки возбуждения *7*. С торцов корпус закрыт подшипниковыми щитами *3*, в которых расположены шарикоподшипники *1*.

Якорь состоит из вала *14*, на который напрессован сердечник *9*, выполненный из отдельных пластин электротехнической стали. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена волновая обмотка *6*. Выводы обмотки присоединены к контактным кольцам *5*.

По кольцам контактируют щетки, помещенные в щеткодержатели *4*. На каждом кольце установлено по два щеткодержателя.

14.7. Тахогенератор ТГС-12

Тахогенератор ТГС-12 работает в качестве датчика частоты вращения колесных пар тепловоза и представляет собой синхронный генератор с магнитоэлектрическим возбуждением. Он может вращаться в обоих направлениях.

Выходная ЭДС

$$E = C_e \Phi n ,$$

так как Φ — const, то можно записать

$$E = Kn ,$$

где $K = C_e \Phi$.

Таким образом можно записать $E \cong n$.

14.8. Синхронный генератор управления 2ГВ-001

Синхронный генератор управления 2ГВ-001 предназначен для питания (после выпрямления) цепей управления, освещения и зарядки аккумуляторных батарей электровозов двойного питания ВЛ82 и ВЛ82^м (рис. 14.9).

Сердечник статора *2* собран из отдельных пластин электротехнической стали и запрессован в корпус *1*. В сердечнике сделаны пазы куда уложены

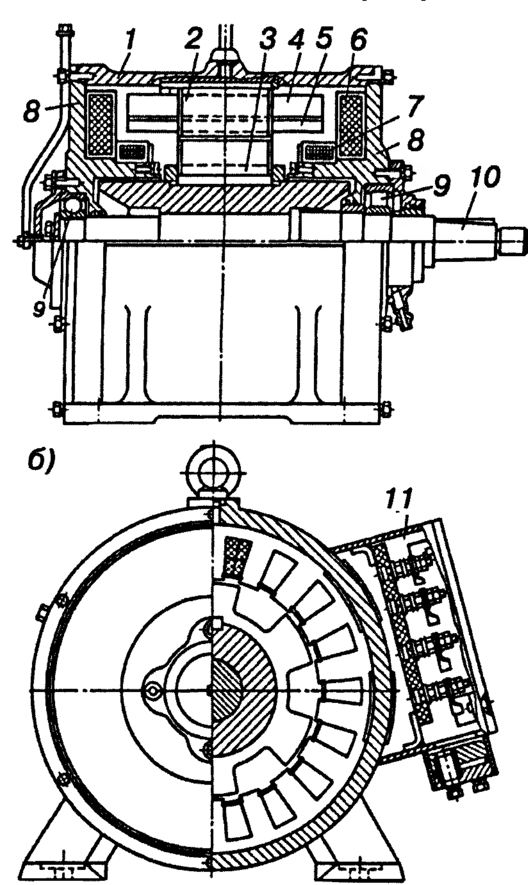


Рис. 14.9. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы генератора 2ГВ-001:

1 — корпус; 2 — сердечник статора; 3 — ротор; 4 — обмотка статора; 5 — дополнительная обмотка статора; 6 — параллельная катушка; 7 — последовательная катушка; 8 — подшипниковый щит; 9 — якорный подшипник; 10 — вал; 11 — коробка выводов

две трехфазные обмотки *4* и *5*, соединенные в «звезду». Кроме того генератор имеет две катушки: параллельную *6* и последовательную *7*.

Ротор состоит из вала *10*, опирающегося на подшипники *9*, помещенные в подшипниковые щиты *8*, втулки и сердечника. Втулка напрессована на вал, а на втулку напрессован сердечник *3*, собранный из листов электротехнической стали. Приводом генератора является двигатель вентилятора. Технические данные синхронного генератора следующие:

Мощность, кВА	7,6/ 0,75
Напряжение линейное, В	48/15
Ток, А	91/29
Число фаз	3
Частота вращения, об/мин:	
номинальная	2500/2500
максимальная	3120/3120
Напряжение обмотки возбуждения, В	32
Частота, Гц	250 –312
Масса генератора, кг	200

Примечание. В числителе приведены данные для основной обмотки, а в знаменателе — для дополнительной.

14.9 Преобразователь 1ПБ.005

На электропоездах ЭР2Р установлен преобразователь, состоящий из синхронного генератора и привода, являющегося двигателем постоянного тока

Технические данные преобразователя:

Показатель	Двигатель	Синхронный генератор
Мощность, кВт	50	30
Напряжение, В	3000	220
Ток якоря,А	19,2	94,3
Частота вращения, об/мин	1000	1000
Класс изоляции	В	В
Число щеткодержателей	4	4

14.9.1. Синхронный генератор

Синхронный генератор предназначен для питания вспомогательных цепей электропоезда трехфазным переменным напряжением 220В, частотой 50 Гц.

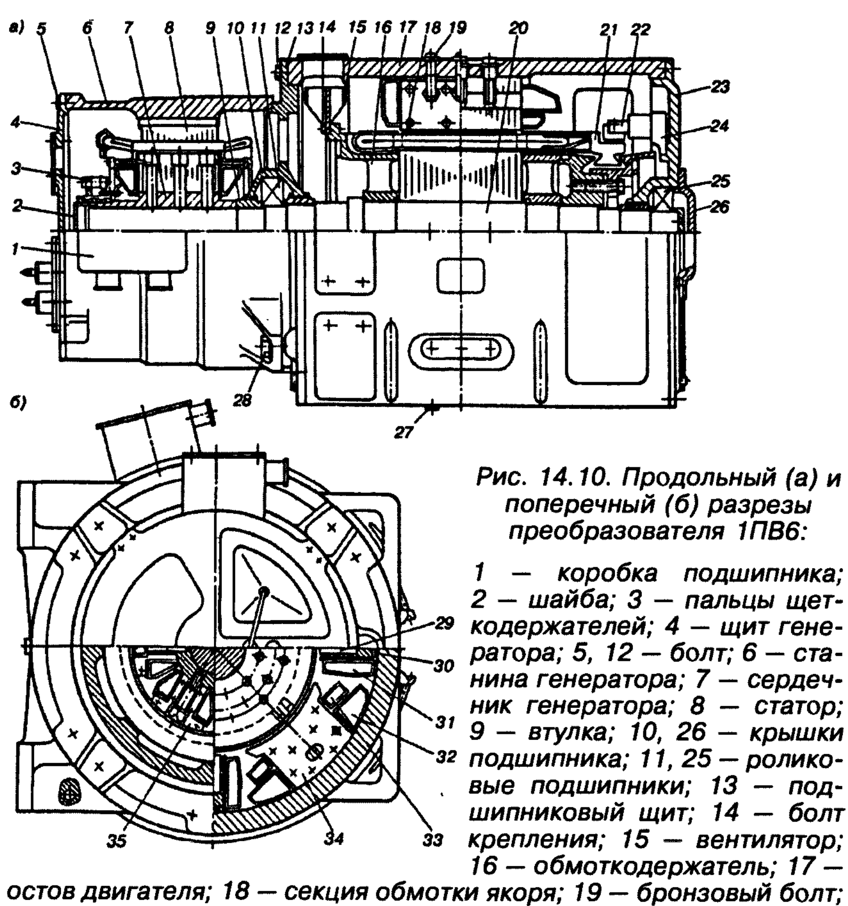


Рис. 14.10. Продольный (а) и поперечный (б) разрезы преобразователя 1ПВ6:

1 — коробка подшипника; 2 — шайба; 3 — пальцы щеткодержателей; 4 — щит генератора; 5, 12 — болт; 6 — станина генератора; 7 — сердечник генератора; 8 — статор; 9 — втулка; 10, 26 — крышки подшипника; 11, 25 — роликовые подшипники; 13 — подшипниковый щит; 14 — болт крепления; 15 — вентилятор; 16 — обмоткодержатель; 17 — остов двигателя; 18 — секция обмотки якоря; 19 — бронзовый болт; 20 — вал; 21 — коллектор двигателя; 22 — щеткодержатель; 23— ит двигателя; 24 — траверса; 27 — болты для слива конденсата; — болты, крепящие статор; 29 — сердечник дополнительного люса; 30 — латунные прокладки; 31 — катушка дополнительного олюса; 32 — катушка независимого возбуждения; 33 — катушка оследовательного возбуждения; 34 — сердечник главного полюса; 35 — полюса ротора генератора

Корпус *6* генератора, выполненный из стального литья, установлен на замок подшипникового щита двигателя преобразователя и прикреплен к нему четырьмя болтами. В корпус запрессован сердечник статора который фиксируется шпонкой, приваренной к корпусу.

Сердечник статора набран из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм.

В сердечнике выштампованы пазы, изолированные двумя слоями элекрокартона, толщиной 0,2 мм, между которыми проложен гибкий меканит толщиной 0,2 мм. В пазы уложены катушки трехфазной обмотки. Изоляция между катушками выполнена из одного слоя электрокартона и одного слоя миканита. Катушки в пазах крепят деревянными клиньями.

Вал роторов генератора и двигателя общий. На вал установлен литой стальной сердечник *8*, имеющий шестигранную форму. Он удерживается на валу шпонкой. К сердечнику посредствам болтов крепятся полюсы, набранные из отдельных стальных листов. На сердечниках полюсов расположены катушки возбуждения, соединенные последовательно. Изоляция полюсных катушек выполнена из одного слоя стеклоэскапоновой ленты и одного слоя киперной ленты. Катушки дважды пропитывают в компаунде 225.

На сердечник ротора напрессовывают стальную втулку покрытую пластмассой, на которой смонтированы два контактных кольца. К торцу корпуса крепят щит. На щите посредством кронштейна и двух пластмассовых колец прикреплены четыре щеткодержателя. Корпус щеткодержателя изготовлен из стальных штампованных деталей. В нем установлены щетки М-6.

14.9.2. Двигатель постоянного тока

Двигатель предназначен для приведение во вращение ротора синхронного генератора и представляет собой одноколлекторную машину постоянного тока со смешанным возбуждением.

Остов *17* стальной, имеет цилиндрическую форму и содержит четыре прилива для подвески его к раме вагона.

К внутреней стороне остова прикреплены четыре главных и четыре добавочных полюса. Сердечники главных полюсов набра-

ны из отдельных листов электротехнической стали. Сердечники *29* добавочных полюсов выполнены из стального литья. Между сердечниками добавочных полюсов и остовом установлены диамагнитные прокладки *30* толщиной 6 мм. На каждом главном полюсе имеется по две обмотки: выского напряжения — последовательного возбуждения *33* и низкого напряжения — независимого возбуждения *32*. Каждый добавочный полюс имеет по одной обмотке возбуждения *31* высокого напряжения.

Корпусная изоляция катушек возбуждения высшего напряжения выполнена из одного слоя тафтяной ленты, намотанной встык, четырех слоев стеклоэскапоновой лакоткани и одного слоя киперной ленты.

Обмотка независемого возбуждения имеет корпусную изоляцию из одного слоя стеклоэскапоновой лакоткани и одного слоя стеклоленты.

С торцевых сторон остова устанавливают подшипниковые щиты.

Якорь состоит из вала *20,* на который напресован сердечник 18 якоря,выполненый из отдельных пластин электротех — нической стали. В сердечнике сделаны пазы, куда уложена простая волновая обмотка *18*. Корпусная изоляция обмотки якоря состоит из четырех слоев липкой стеклоэскапоновой лакоткани и одного слоя стеклоленты. Пазовые и лобовые части обмотки крепят бандажной стеклолентой.

Изоляцией коллектора является миканитовый цилиндр и манжеты. Пластины *21* изолированы друг от друга миканитовыми прокладками.

Собранный якорь удерживается на валу шпонками. Четыре щеткодержателя со щетками закреплены на траверсе. Вентилятор *12* насажен на вал со стороны противоположной колектору.

14.9. Асинхронный электродвигатель АМВ-37-03М

Электродвигатель (рис. 14.11) встроен в вентилятор и предназначен для охлаждения воды и масла дизеля. Представляет собой вертикальную трехфазную асинхронную машину с короткозамкнутым ротором, обращенного типа, т.е. статор с обмоткой рас-

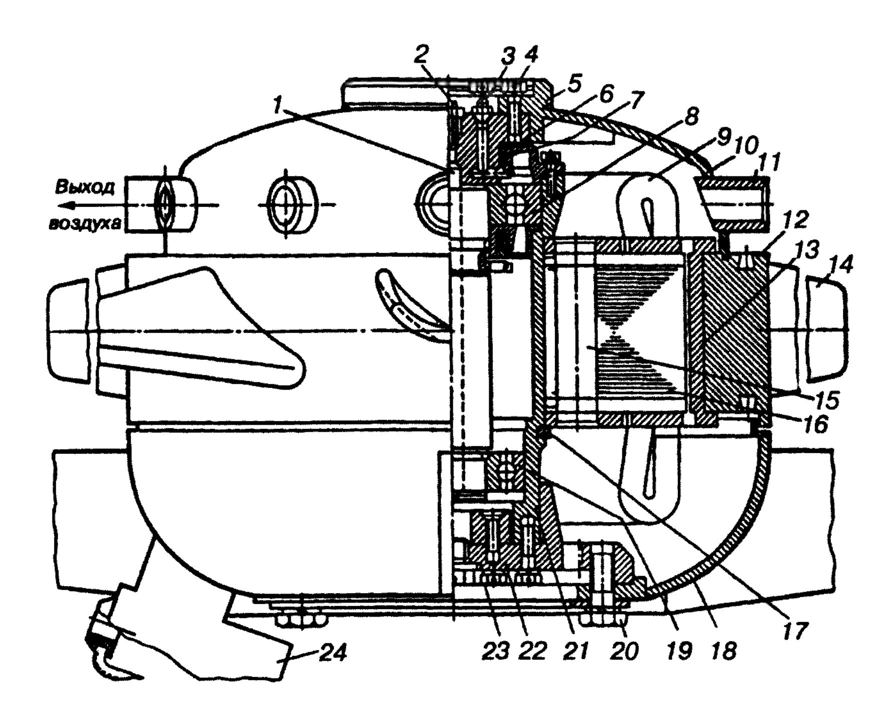


Рис. 14.11. Мотор-вентилятор МВ11, асинхронный электродвигатель АМВ 37-03:

1 — вал; 2, 3 — пресс-масленки; 4, 10, 23 — болты; 5 — ступица; 6 — фланец; 7 — лабиритные уплотнители; 8, 19 — подшипники; 9 — обмотка статора; 10, 18 — днища; 11 — сопла; 12 — сердечник ротора; 13 — короткозамкнутая обмотка ротора; 14 — лопасти; 15 — каналы; 16 — сердечник статора; 17 — кольцо; 21 — остов статора; 22 — основание; 24 — коробка выводов

положен внутри, а ротор находится снаружи. Обмотка ротора *13* короткозамкнутая (типа «беличье колесо»), выполнена из алюминиевого сплава; к торцу сердечника приварено сферическое днище *10* вала *1*. К индуктору ротора служащему корпусом электродвигателя, по внешнему периметру приварены лопасти 14 осевого вентилятора. Вал крепится болтами через фланец к ступице сферического днища и вращается вместе с ним. На остов насажен сердечник статора 16, в пазах которого по внешнему периметру размещена обмотка 9. Концы обмотки подсоединены

к коробке выводов 24. Охлаждающий воздух поступает через основание, проходит по каналам 15 сердечника статора и выходит через сопло 11, расположенное по окружности в днище ротора.

Смазка в подшипник подается через пресс-масленки и в отверстия просверленные в вале.

Контрольные вопросы

1. Каково назначение вспомогательных машин переменного тока ТПС?
2. Каково назначение расщепителя фаз?
3. Каков принцип действия расщепителя фаз?
4. Каково назначение мотор-насоса?
5. На каком ТПС установлен пробразователь 1ПВ.005?
6. Каково назначение асинхронного электродвигателя АМВ-37-03М?

Глава 15.

Потери энергии и коэффициент полезного действия. Нагревание и охлаждение электрических машин

15.1. Потери в электрических машинах

При работе электрической машины в режиме генератора или двигателя часть потребляемой ее энергии бесполезно теряется в виде тепла. Мощность потерянной энергии называют *потерями мощности* или просто *потерями.*

Потери в электрической машине относительно небольшие. В машинах постоянного тока потери составляют 4–10% от подведенной мощности, а в мощных синхронных машинах, например, турбогенераторах с водородным охлаждением они составляют 1–2%. Так как огромное количество электроэнергии преобразуется, то величина потерь достигает внушительных значений.

Потери в электрических машинах можно условно разделить на основные и добавочные. Основные потери в свою очередь подразделяются на электрические, магнитные и механичес-кие.

Электрические потери являются переменными, так как зависят от тока нагрузки. Их рассчитывают по формуле Джоуля-Ленца

$$P_{эл} = I^2 r \, , \qquad (15.1)$$

где I — действующее значение тока,А

r — активное сопротивление обмотки, Ом.

Сопротвление обмотки зависит от ее температуры. Действующими государственными стандартами предусмотрено определение потерь в обмотках при расчетной температкре 75°С для классов изоляции А,Е и В и 115°С для классов изоляции F и Н. В машинах постоянного тока, как правило, имеются две электрические цепи: цепь якоря и цепь возбуждения. Поэтому отдельно рассчитывают потери в обмотках якоря, обмотках возбуждения и щеточном аппарате.

Потери в обмотках якоря

$$P = I_а^2 r, \qquad (15.2)$$

где r — сопротивление обмоток цепи якоря, зависящих от температуры.

$$r = r_{20}(1 + \alpha(\theta - 20)) , \qquad (15.3)$$

r_{20} — сопротивление обмоток в цепи якоря (якоря, обмоток возбуждения добавочных полюсов, компенсационной обмотки) при температуре 20°C;

α — температурный коэффициент, для меди и алюминия (α = 0,004).

Потери в обмотках возбуждения главных порлюсов

$$P_{эл.в} = U_в I_в \, . \qquad (15.4)$$

где $U_в$ — напряжение на зажимах цепи возбуждения.

Потери в переходных сопротивлениях щеточных контактов

$$P_{эл.щ} = U_щ I_а \, ,$$

где $U_щ$ — переходное падение напряжения, В, на щетках, обеих полярностей, зависящее от марки щеток.

Суммарные электрические потери

$$P_{эл} = P_{эл.а} + P_{эл.в} + P_{эл.щ'} \, .$$

Магнитные потери — это потери на гистерезис и вихревые токи, вызванные перемагничиванием сердечников.

Потери на гистерезис бывают при циклическом перемагничивании, которое происходит в трансформаторах и в зубцовом слое электрических машин. В этом случае вектор магнитной индуктии изменяется от нуля до максимального значения.

При вращательном перемагничивании стали также имеют место потери на гистеразис. Индуктия в сердечниках машин и трансформаторов обычно составляет меньше 1,5 Тл. Опытным путем установлено, что потери при вращательном перемагничивании больше в среднем в 1,8 раза, чем при циклическом перемагничивании.

При перемагничивании стали в ней индуцируется ЭДС,

направление которой определяется по правилу «правой руки». ЭДС создает такого же направления токи, которые называют вихревыми. Вихревые токи способствуют нагреванию стали. Для уменьшения этих потерь элементы магнитопроводов собирают из отдельных листов, изолированных друг от друга.

На вращающемся якоре имеются пазы и зубцы. Вследствии этого возникают дополнительные потери в сердечниках полюсов машин постоянного тока (см. гл. 1) и явнополюсных синхронных машинах, обусловленных колебанием индуктии.

При наличии компенсационной обмотки в наконечниках главных полюсов имеются пазы, вследствии этого, в зубцах якоря и в зубцах полюсов в результате их взаимного перемещения возникают пульсации магнитного потока. Эти пульсации проникают на небольшую глубину, поэтому потери от них нагревают поверхность.

Потери в стали суммируются:

механические потери $P_{мех}$ — это потери от трения в подшипниках $P_{п}$, трения щеток о коллектор $P_{к}$ и потери на вентиляцию $P_{вен}$

$$P_{мех} = P_{п} + P_{к} + P_{вен} ; \qquad (15.7)$$

добавочные потери $P_{доб}$ зависят от значения основного магнитного потока машины (потока полюсов) и вызваны зубчатым строением сердечников. К ним относятся потери от вихревых токов в меди обмоток, потери в уравнительных соединениях и др. Добавочные потери точно учесть почти невозможно, но они небольшие и на основании опытных данных их обычно принимают равными 1% номинальной мощности для машин постоянного тока без компенсационной обмотки. Для машин с компенсационной обмоткой и машин переменного тока значение добавочных потерь принимают равным 0,5%.

Полные или суммарные, потери

$$\Delta P = P_{эл} + P_{м} + P_{мех} + P_{доб} .$$

Сумма магнитных и механических потерь составляют потери холостого хода

$$P_{0} = P_{м} + P_{мех} . \qquad (15.8)$$

Подводимая к машине мощность:
для генератора

$$P_{1ген}=0,105\ M_1\ n\ ;\quad P_{1ген} = M_1\omega\ , \qquad (15.9)$$

где M_1 — вращающий момент приводного двигателя, Н×м;

для двигателя

$$P_{1дв} = UI\ . \qquad (15.10)$$

Выходная мощность:
для генератора

$$P_{2ген} = UI; \qquad (15.11)$$

для двигателя

$$P_{2дв} = 0,105 M_2 n\ , \qquad (15.12)$$

где M_2 — момент на валу электрической машины.

15.2. Коэффициент полезного действия К.п.д. определяется, как отношение полезной или отдаваемой мощности P_2 к потребляемой мощности P_1,

$$\eta = P_2/P_1; \qquad (15.13)$$

или в %

$$\eta = (P_2/P_1)\times 100\%\ ; \qquad (15.14)$$

для генератора

$$\eta = P_2/(UI + \Delta P) = UI/(UI + \Delta P)\ ; \qquad (15.15)$$

для двигателя

$$\eta = (UI - \Delta P)/UI = 1 - \Delta P/UI\ . \qquad (15.16)$$

Электрические машины имеют самый высокий К.П.Д. среди других машин. Так, у машин постоянного тока мощностью от 1 до 100 кВт КПД составляет 0,7–0,9, свыше 100 кВт — 0,9–0,97.

У синхронных машин мощностью до 100 кВт составляет 0,8–0,9; более мощные синхронные генераторы имеют КПД 0,92–0,99. Турбогенераторы и гидрогенераторы имеют более высокий КПД. Асинхронные двигатели мощностью от 1 до 10 кВт имеют КПД 0,75..0,88; для двигателей мощностью более 10 кВт — 0,9–0,94.

15.3. Нагревание электрических машин

Как отмечалось выше, все потери энергии в электрической машине преобразуются в теплоту Q. Одна часть теплоты Q_1 расходуется на повышение температуры машины, а другая часть Q_2 — отдается в окружающую среду

$$Q = Q_1 + Q_2 . \qquad (15.17)$$

Для анализа процесса нагревания предположим, что нагрев происходит равномерно по всему объему машины, а рассеивание теплоты происходит равномерно со всей поверхности.

Составим уравнение нагревания, для чего рассмотрим тепловой баланс. Количество теплоты Q,выделяемой в машине за бесконечно малый промежуток времени dt будет Qdt. Эта теплота, как было сказано выше, частично остается в машине и частично отдается в окружающую среду.

Пусть за время dt температура машины массой G, повысилась на $d\tau$, тогда количество теплоты поглощаемой машиной составит $Gcd\tau$, где c — удельная теплоемкость, т.е. количество теплоты, необходимой для нагревания 1 кг вещества на 1^0C.

Если за время dt превышение температуры машины над температурой окружающей среды составило τ, то количество теплоты, отдаваемое в окружающую среду будет $S\lambda\tau dt$, где S — площадь тела и λ — коэффициент теплоотдачи с поверхности.

В соответствии с законом сохранения энергии составим уравнение теплового баланса

$$Qdt = Gcd\tau + S\lambda\tau dt . \qquad (15.18)$$

В начальный период времени температура машины и окружающей среды одинакова ($\tau \approx 0$). При дальнейшей работе

нагрев машины увеличивается, при этом часть теплоты отдается в окружающую среду. И, наконец, наступает такой момент когда дальнейшее увеличение температуры нагрева машины прекратится, и вся выделенная теплота будет отдаваться в окружающкю среду. Это — режим теплового равновесия ($cGd\tau = 0$).

$$Qdt = S\lambda\tau_у dt\ , \tag{15.19}$$

$$Q = S\lambda\tau_у\ , \tag{15.19, а}$$

где $\tau_у$ — установившаяся температура перегрева машины

$$\tau_у = Q/(S\lambda)\ . \tag{15.20}$$

Подставив значение (15.19а) в (15.18) получаем

$$S\lambda\tau_у = cGd\tau + S\lambda\tau dt\ . \tag{15.21}$$

Решаем уравнение (15.21) при нулевых начальных условиях

$$\tau = \tau_у\left(1 - e^{-t/T}\right), \tag{15.22}$$

где $e = 2{,}718$ — основание натуральных логарифмов;

Т — постоянная времени нагревания машины, $T = cG/S$ — представляет собой время, в течение которого машина нагревалась бы до наибольшей установившейся температуры, если бы теплота не рассеивалась в окружающую среду.

Графически T определяется отрезком AB (рис. 15.1). Зависимость $\tau = f(t)$ представляет собой экспоненту (кривая Oa, рис. 15.1). Экспонента показывает, что машина достигает установившегося значения температуры перегрева лишь по истечении длительного времени. Теоретически тело достигает установившейся

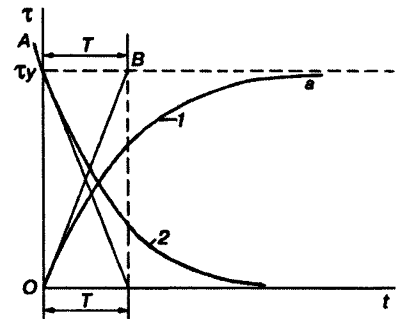


Рис. 15.1. Кривые нагревания (1) и охлаждения (2) электрических машин

температуры по истечении бесконечно большого времени. Практически считают, что тепловой режим становится установившемся при (4–5)T.

Если отключить машину от сети, то ее нагревание прекратится и уравнение теплового баланса примет вид

$$0 = Gcd\tau + S\lambda\tau dt,$$

или

$$-Gcd\tau = S\lambda\tau dt \qquad (15.23)$$

Решая уравнение (15.23) получим

$$\tau = \tau_у e^{-t/T}. \qquad (15.24)$$

Из уравнения (15.24) видно, что остывание машины также происходит по экспоненциальному закону (рис.15.1, кривая 2).

Процессы нагрева и охлаждения машин протекают сравнительно медленно. Так, постоянные времени нагрева некоторых вспомогательных машин ТПС лежат в пределах от 0,5 до нескольких часов.

Из-за низкой теплопроводности изоляции обмоток электрических машин возможно некоторое отличие теоретического и действительного изменения процесса нагрева обмоток в начале нагревания.

Нагревание электрических машин существенно влияет на их долговечность. Электрические устройства подвижного состава рассчитывают на срок службы от 10 до 30 лет. Срок службы машины определяется состоянием изоляции ее обмоток. Как известно из курса «Материаловедение», электроизоляционные материалы делят на классы нагревостойкости А, Е, В, Н,С. В электрических машинах ТПС применяют изоляцию классов В, F, Н и С. Каждому классу соотвествует определенная предельно допустимая температура нагрева. Если температура ее изоляции не превышает предельно допустимое значение, то машина может работать в течение длительного времени. Установлено, что превышение допустимой температуры изоляции на 8°С снижает ее срок службы примерно вдвое (*правило восьми градусов*). Температуру окружающей среды принимают равной +40^{0}С. При

расчетах срока службы за условную температуру окружающей среды принимают +25°С. Для общепромышленных электротехнических устройств, рассчитанных на большой срок службы, предельно допустимую температуру уменьшают на 20–30%.

15.4. Основные режимы работы электрических машин

При работе в условиях ремонтного производства технику по техническому обслуживанию, эксплуатации и ремонту тягового подвижного состава приходится эксплуатировать ремонтные стенды и установки, приводом которых являются общепромышленные электрические машины с разными режимами работы. Некоторые из них, например, электроприводы вентиляторных установок работают в течение длительного времени, а электродвигатели грузоподъемных кранов работают в течение относительно короткого промежутка времени.

При разных режимах работы электрические машины нагреваются неодинаково. С точки зрения наиболее рационального использования материалов, из которых изготовлена машина, целесообразно, чтобы нагрев частей электрической машины в реальных условиях ее эксплуатации был близок к допустимому по государственным стандартам. Но, в этом случае каждый двигатель придется проектировать и изготовлять индивидуально и организовать массовое производство невозможно. Поэтому производственные механизмы по характеру изменения нагрузки на валу унифицированы. Электрические машины рассчитывают и изготовляют для трех основных режимов работы.

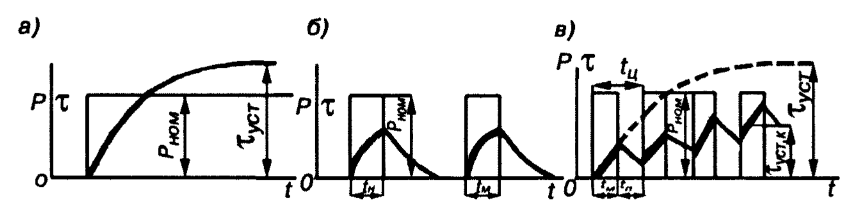
1. *Продолжительный номинальный режим работы.* В этом режиме время работы при номинальной нагрузке столь велико, что температура электрической машины достигает установившегося значения (рис.15.2, *а*). Условное обозначение режима *S1*.

2. *Кратковременный режим работы* характеризуется тем, что периоды неизменной номинальной нагрузки чередуются с периодами отключения. За время работы температура электрической машины не успевает достигнуть установившегося значения, а периоды отключения столь длительны, что машина осты-

вает до температуры окружающей среды (рис. 15.2, *б*). Условное обозначение режима *S2*.

3. *Повторно-кратковременный номинальный режим.* Этот режим работы характеризуется тем, что кратковременные рабочие периоды чередуются с периодами отключений. При этом режиме ни в одном из периодов работы температура машины не достигает установившегося значения, а во время паузы двигатель не успевает остынуть до температуры окружающей среды (рис. 15.2, *в*). Условное обозначение режима *S3*.

Условные обзначения режимов приводятся в паспорте электрической машины.



15.2. Графики i = f(t) для продолжительного (а), кратковременного (б) и повторно-кратковременного (в) режимов работы электрических машин

15.5. Охлаждение электрических машин

Охлаждение электрической машины бывает двух видов: естественное и искусственное.

Естественное охлаждение в свою очередь подразделяется на охлаждение за счет теплопроводности и охлаждение за счет конвекции.

Теплопроводность — это передача тепла внутри твердого тела от более нагретых слоев менее нагретым. Например, передача тепла от обмоток через пазовую часть сердечнику статора, а от сердечника — корпусу.

Конвекция — это перенос теплоты потоками воздуха. Частицы воздуха, омывая нагретые части машины нагреваются и поднимаются вверх, уступая место менее нагретым частицам. Такое охлаждение применяется или в машинах малой мощности или в машинах очень большой мощности.

Из формулы (15.20) следует, что температура нагрева машины зависит от площади охлаждаемой поверхности. Поэтому для увеличения поверхности охлаждения некоторые машины выполняют ребристыми (рис. 15.3).

Для более интенсивного охлаждения применяют специальные устройства — *вентиляторы*, создающие магнитный поток воздуха внутри машины. Как отмечалось выше, мощные тяговые электродвигатели и тяговые тенераторы выполняют с независимой вентиляцией. Специальные вентиляторы (мотор-вентиляторы) приводятся во вращение двигателями постоянного или переменного тока. Это позволяет производить охлаждение тягового электродвигателя при малых скоростях движения на затяжных подъемах или спусках с большой токовой перегрузкой.

Различают *индивидуальную и групповую независимые вентиляции*. При независимой индивидуальной вентиляции один вентилятор охлаждает один тяговый электродвигатель, например, электровозы переменного тока ВЛ80^т и ВЛ80^с. При групповой независимой вентиляции от одного вентилятора охлаждаются тяговые электродвигатели одной тележки, как, например, электровозы ВЛ10 и ВЛ11.

При самовентиляции на вал электродвигателя насаживают вентилятор, создающий поток воздуха внутри машины. Самовентиляция применяется в тяговых электродвигателях электро-

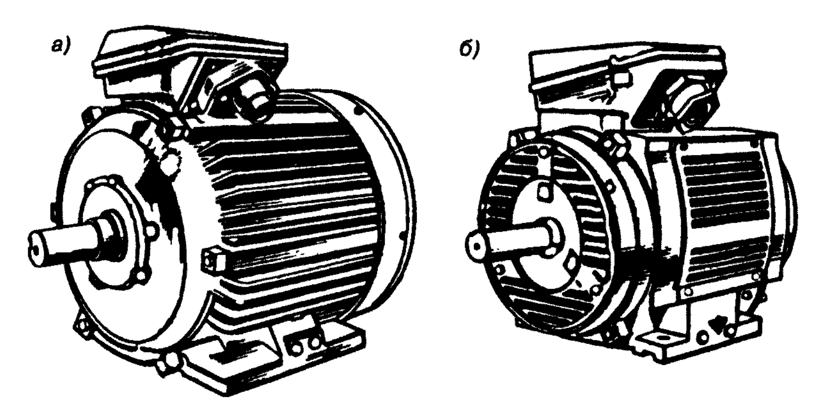


Рис. 15.3. Асинхронные двигатели серии 4А:

а — закрытого обдуваемого исполнения; б — защищенного исполнения

поездов, а также во вспомогательных и специальных машинах тягового подвижного состава.

Воздух обычно поступает со стороны коллектора, чем обеспечивается более низкая температура коллекторно-щеточного узла.

Различают *аксиальную* (рис. 15.4, *а*) и *радиальную* (рис. 15, *б*) *системы вентиляции*. При аксиальной вентиляции синхронных машин и машин постоянного тока, поток воздуха движется меж-

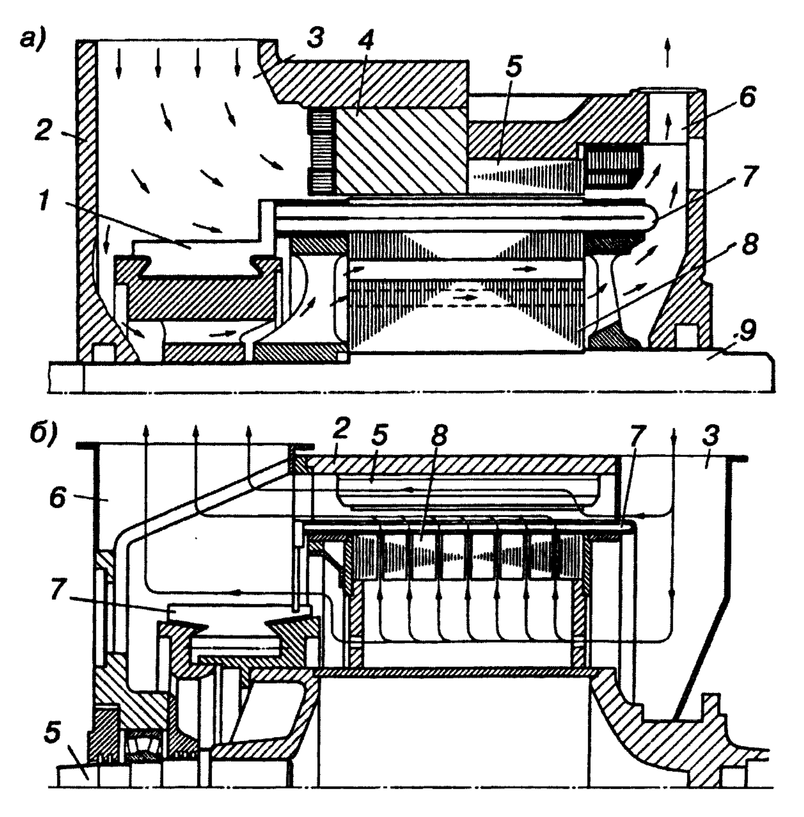


Рис.15.4. Схемы независимой системы охлаждения:

а — аксиально-осевая; б — радиально-осевая; 1 — коллектор; 2 — корпус (остов); 3 — входное вентиляционное отверстие; 4 — добавочный полюс; 5 — главный полюс; 6 — выходное отверстие; 7 — задние лобовые части обмотки якоря; 8 — якорь; 9 — вал

ду полюсами и вдоль внешней поверхности якоря, а также по аксиальным каналам ротора. Воздух поступает в машину с одного ее конца и выбрасывается с другого.

При радиальной системе вентиляции сердечник якоря имеет радиальные каналы, которые получаются делением общей длины сердечника на пакеты по 40–60 мм. Между пакетами оставляют промежутки по 10 мм, которые и являются радиальными каналами.

Также различают вентиляцию нагнетательную и вытяжную. При нагнетательной вентиляции в машине создается давление, превышающее атмосферное, благодаря чему внутрь машины не проникают пыль и влага. Однако воздух поступает уже подогретым в вентиляторе. Из-за этого нагнетательную самовентиляцию применяют в машинах небольшой мощности.

Контрольные вопросы

1. Какие виды потерь существуют в машинах постоянного тока?
2. Какие виды потерь не зависят от нагрузки?
3. Что собой представляют добавочные потери?
4. Что такое «режим теплового равновесия» в электрической машине?
5. Перечислите способы охлаждения электрических машин и дайте каждому из них характеристику.

Раздел 3.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Глава 16.

Принцип действия и устройство трансформаторов

16.1. Принцип действия

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения.

Трансформатор (рис. 16.1) состоит из сердечника, набранного из листов электротехнической стали и двух или нескольких обмоток. Передача энергии из одной обмотки в другую производится путем электромагнитной индукции.

Обмотка, к которой подводится переменный ток, называется первичной. К другой обмотке подключен потребитель $Z_н$. Эта обмотка называется вторичной. Все величины (ток, напряжение, ЭДС, МДС, число витков), относящиеся к первичной обмотке обозначают индексом 1. Те же величины, относящиеся ко вторичной обмотке, обозначают индексом 2.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки

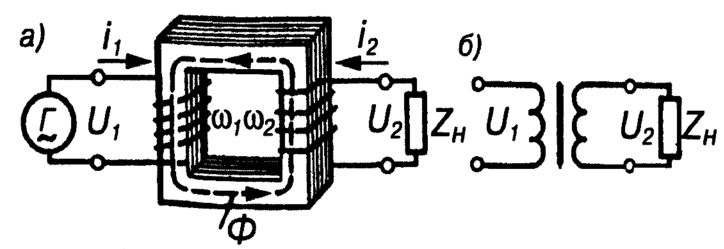


Рис. 16.1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы трансформатора

трансформатора (рис. 16.1) к сети с переменным синусоидальным переменным напряжением U_1 в обмотке возникает ток I_1, который создает синусоидально изменяющийся магнитный поток Φ, замыкающийся по магнитопроводу и пересекающие витки первичной и вторичной обмоток, индуктирует в них ЭДС. В первичной обмотке индуктируется ЭДС e_1 самоиндуктии

$$e_1 = -w_1(d\Phi/dt) \qquad (16.1)$$

во вторичной обмотке индуктируется ЭДС взаимоиндуктии

$$e_2 = -w_2(d\Phi/dt) \qquad (16.2)$$

Знак «–» указывает, что ЭДС e_1 и e_2 направлены против причины их вызвавшей, т.е. против изменения магнитного потока (правило Ленца). Если ко вторичной обмотке подключить нагрузку $Z_н$, то по этой обмотке будет протекать ток I_2 и на ее зажимах появляется некоторое напряжение U_2. Результирующий магнитный поток Φ создается токами этих обмоток. Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют *обмоткой высокого напряжения* (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, называют *обмоткой низкого напряжения — (НН).*

Предположим, что магнитный поток Φ является синусоидальной функцией времени, т.е.

$$\Phi = \Phi_{max}\sin\omega t, \qquad (16.3)$$

где Φ_{max} — максимальное значение потока, Вб.

Подставив (16.3) в (16.1), получим

$$e_1 = -w_1(d(\Phi_{max}\sin\omega t))/dt = -w_1\Phi_{max}\omega\cos\omega t. \qquad (16.4)$$

Из математики известно, что $\cos\omega t = -\sin\omega t\ (\omega t - 90°)$

$$e_1 = w_1\Phi_{max}\omega\sin(\omega t - 90^0)\ . \qquad (16.5)$$

То же с ЭДС e_2

$$e_2 = w_2\Phi_{max}\omega\sin(\omega t - 90^0)\ . \qquad (16.5,\ a)$$

В формулах (16.5) и (16.5, *а*) максимальное значение ЭДС

$$E_{1max} = w_1 \Phi_{max} \omega \quad , \qquad (16.6)$$

$$E_{2\,max} = w_2 \Phi_{max} \omega . \qquad (16.7)$$

Учитывая, что $\omega = 2\pi f$, определим действующие значения ЭДС E_1 и E_2

$$E_1 = (w_1 \Phi_{max} \pi f)/\sqrt{2} = 4{,}44 w_1 \Phi_{max} f \, , \qquad (16.8)$$

$$E_2 = (w_2 \Phi_{max} \pi f)/\sqrt{2} = 4{,}44 w_2 \Phi_{max} f \, . \qquad (16.9)$$

Отношение ЭДС высшего напряжения к ЭДС низшего напряжения называется коэффициентом трансформации k

$$k = E_1/E_2 = (4{,}44 w_1 \Phi_{max} f)/(4{,}44 w_2 \Phi_{max} f) = w_1/w_2 \approx \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} \, . \qquad (16.10)$$

16.2. Устройство трансформатора

Части трансформатора, предназначенные для преобразования напряжения (магнитопровод и обмотки) называются *активными частями трансформатора.*

При работе трансформатора выделяется теплота. Для охлаждения активной части применяют воздух или трансформаторное масло. В первом случае трансформатор называется «сухим», а во втором случае «маслянным». В последнем случае активную часть помещают в бак с трансформаторным маслом. Трансформаторное масло одновременно выполняет роль изоляции. В паспортных табличках силового трансформатора указываются следующие данные: 1) номинальная полная мощность $S_н$, кВА; 2) номинальные линейные напряжения обмоток $U_{лн}$, В,кВ; 3) номинальные линейные токи $I_{л.н}$, А; 4) номинальная частота f, Гц; 5) число фаз, m; 6) схема и группа соединений обмоток; 7) напряжение к.з. $u_к$, %; 8) режим работы (длительный, кратковременный); 9) способ охлаждения.

16.2.1. Конструкция магнитопровода

К магнитопроводу предъявляют определенные требования: 1) небольшое магнитное сопротивление; 2) минимальные магнитные потери; 3) высокая механическая прочность.

Часть магнитопровода, на котором расположена обмотка называют *стержнем*. *Ярмо* предназначено для соединения стержней в замкнутую магнитную цепь.

Магнитопровод трансформатора изготовляют из отдельных пластин электротехнической стали, толщиной 0,35 или 0,5 мм при частоте 50 Гц и толщиной от 0,08 до 0,2 мм при частоте 400 Гц. Листы изолируют друг от друга лаком или жаростойким покрытием в виде керамических или оксидных пленок, которые не повреждаются при заготовке пластин и их отжиге.

Однофазный стержневой трансформатор (рис. 16.2, *а*) имеет два стержня *С*, на которых расположены обмотки и два ярма *Я*.

Однофазный броневой трансформатор (рис. 16.2, *б*) имеет один стержень с обмотками и ярмо, которое частично охватывает обмотки подобно «броне».

Трехфазные трансформаторы (рис. 16.3, *а*, *б*) имеют три одинаковых стержня *1*, соединенные в замкнутую магнитную цепь ярмами *3*. Как стержни, так и ярма изготавливают из отдельных листов электротехнической стали. На стержени одеты катушки *2*.

Бронестержневая конструкция (рис. 16.4) применяется в трансформаторах большой мощности. Эта конструкция, требует повышенного расхода электротехнической стали, но зато уменьшает высоту магнитопровода, что очень важно при перевозках по железным дорогам.

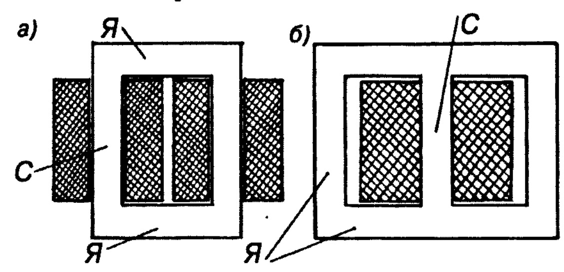


Рис. 16,2. Основные типы однофазных трансформаторов: а — стержневой; б — броневой; с — стержень; я — якорь

По конструкции сочленения стержней с ярмами трансформаторы подразделяются на стыковые (рис. 16.5) и шихтованные магнитопроводы.

В первом случае стержни и ярмо собираются отдельно и соединяются друг с другом с помощью стяжных шпилек, а в места стыков во избежании замыкания листов и возникновения вихревых токов ставятся изоляционные прокладки. Во втором случае стержни и ярма собираются вместе как цельная конструкция, причем листы стержней и ярем собираются в переплет.

В настоящее время магнитопроводы трансформаторов выполняются из холоднокатанной электротехнической стали, которая обладает более лучшими магнитными свойствами, чем горячекатанная.

Однако в этой стали направление проката и направление силовых линий магнитной индуктии должны совпадать. При их насовпадении происходит резкое ухудшение характеристик. Поэтому при сборке магнитопровода из этой стали листы штампуются и

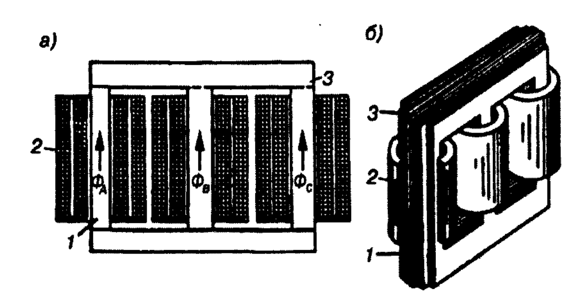


Рис. 16.3. Магнитопровод трехфазного трансформатора стержневого типа с обмотами

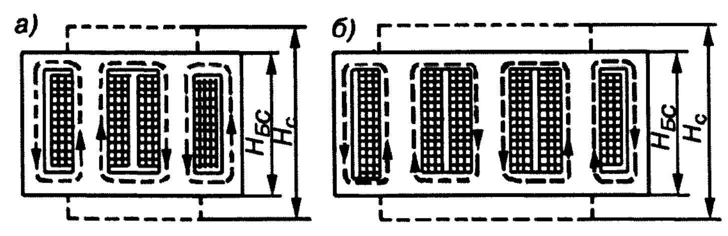


Рис. 16.4. Магнитопровод бронестержневых трансформаторов: а — однофазного; б — трехфазного

укладываются так, чтобы магнитный поток проходил по направлению проката. Если листы имеют прямоугольную форму (рис. 16.6, *а*), то в местах, где линии магнитной индуктии поворачиваются на угол 90°С (заштрихованный участок на рис. 16.6, *а*), то наблюдается увеличение потерь и падение магнитного напряжения, что приводит к некоторому ухудшению магнитных характеристик трансформатора. Эти участки называют «зонами несовпадения». Для уменьшения площади «зон несовпадения» при сборке магнитопроводов из холоднокатанной стали применяют косые стыки, как показанно на рис. 16.6, *б*.

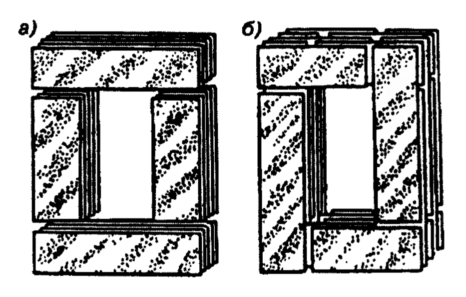


Рис. 16.5. Стыковая (а) и шихтованная (б) конструкция магнитопроводов

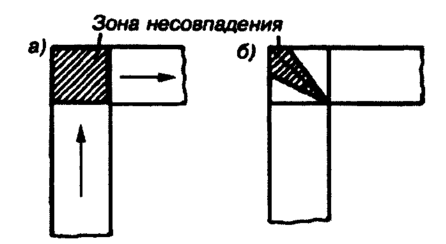


Рис. 16.6. «Зоны несовпадения» при прямом (а) и косом (б)стыках

Стержни магнитопроводов трансформаторов в поперечном сечении имеют форму ступенчатой фигуры или прямоугольника. Число ступеней фигуры увеличивается с возрастанием мощности трансформатора. Увеличние числа ступеней приводит к более полному заполнению площади круга площадью ступенчатой фигуры (ис. 16.7). Такая конструкция с точки зрения расхода материалов, уменьшения габаритов и стоимости изготовления трансформатора, а также механической

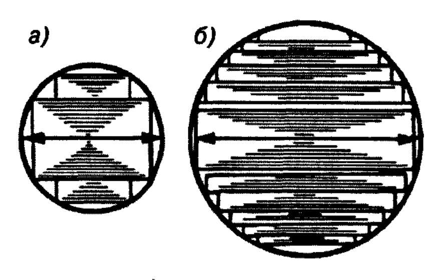


Рис.16.7. Форма сечений стержней:

а — трансформаторов малой и средней мощности; б — трансформаторов большой мощности

прочности обмоток является наиболее рациональной. В мощных трансформаторах в сечении магнитопровода предусматривают каналы для его охлаждения.

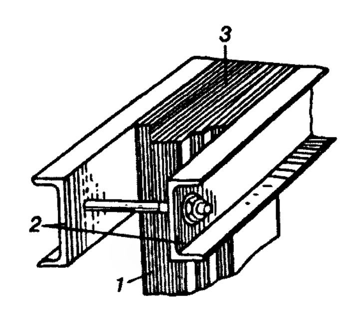


Рис. 16.8. Опрессовка ярма

Сечение ярма берется с небольшим числом ступеней или даже прямоугольным. Это упрощает технологию их изготовления. Площади сечения ярем выбираются так, чтобы индуктия в них была на 10–15% меньше, чем в стержнях. Ярма мощных трансформаторов стягивают со стальными балками (рис. 16.8), а в маломощных трансформаторах — деревянными.

16.2.2. Конструкция обмоток

Материал обмоток — медь, иногда алюминий круглого или прямоугольного сечений. Для их изоляции применяется эмаль, кабельная бумага и хлопчатобумажная пряжа, а в мощных сухих трансформаторах используется нагревостойкая изоляция из стекловолокна. Основой обмотки, как правило, является бумажнобакелитовый цилиндр.

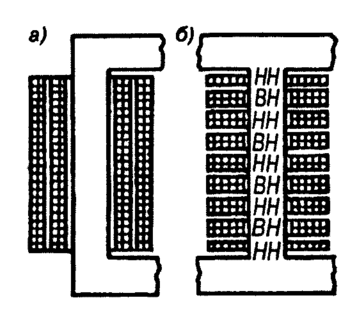


Рис. 16.9. Концентрические (а) и чередующиеся (б) обмотки

На магнитопроводе обмотки располагают двумя способами: концентрическим (рис. 16.9, *а*) и чередующимся (рис. 16.9, *б*). При первом способе на стержнях располагают обмотки низкого напряжения ОНН, которые требуют меньшей изоляции относительно остова, а снаружи — обмотку высшего напряжения ОВН. Во втором способе обмотки ОНН и ОВН, при расположении на стержне, чередуются друг с другом. Чередующиеся обмотки имеют меньшее магнитное сопротивление, но

более сложны в изготовлении. Поэтому наиболее часто применяют концентрические обмотки среди которых можно выделить следующие: многослойную цилиндрическую (рис. 16.10, *а*) и винтовую (рис. 16.10, *б*) и непрерывную спиральную катушечную (рис. 16.10, *в*).

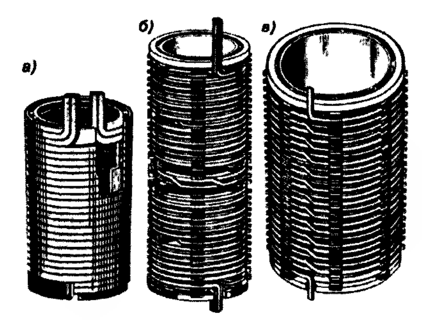


Рис. 16.10. Конструкция концентрических обмоток:

а — двухслойная цилиндрическая; б — винтовая; в — непрерывная спиральная катушечная

Цилиндрические однослойные и многослойные обмотки изготовляют из круглого или прямоугольного проводников. Между слоями прокладывают изоляцию из кабельной бумаги.

Винтовые одно- и многослойные обмотки наматывают из ряда параллельных проводников прямоугольного сечения уложенных по винтовой линии и ряд от ряда отделеных изоляционными прокладками. Для того, чтобы все проводники нагружались одинаковыми токами выполняют транспозицию проводов.

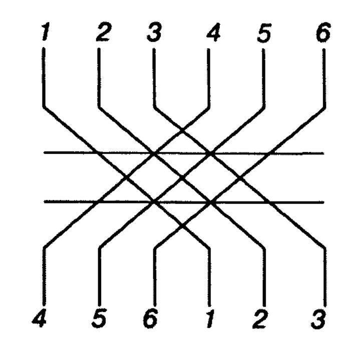


Рис. 16.11. Схема частичной транспозиции параллельных проводников

16.2.3. Трансформаторный бак

При маслянном охлаждении активную часть (так называют магнитопровод с обмотками) помещают в бак с трансформаторным маслом. Баки трансформаторов мощностью до 10кВА имеют гладкие наружние стенки. При мощности от 20 до 1800 кВА к баку приваривают С-образные трубы (рис. 16.12) или

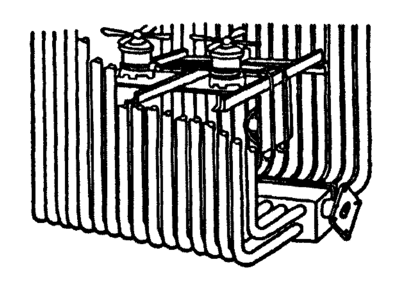


Рис. 16.12. Трубчатый охладитель с вентиляторами

прямоугольные радиаторы, которые увеличивают поверхность охлаждения и по которым циркулирует охлаждаясь масло. Внутри бака возникает естественная конвекция масла. Возле обмоток масло нагревается и поднимается вверх, а у стенок бака и в радиаторах масло охлаждается и опускается вниз, заменяя нагретое масло у обмоток. В тяговых трансформаторах применяют принудительную циркуляцию масла посредством мотор-насоса.

На крышке бака устанавливают вводы *11, 12* (рис. 16.13). Медный стержень, проходящий через фарфоровый изолятор служит для соединения изолятора с внешней сетью.

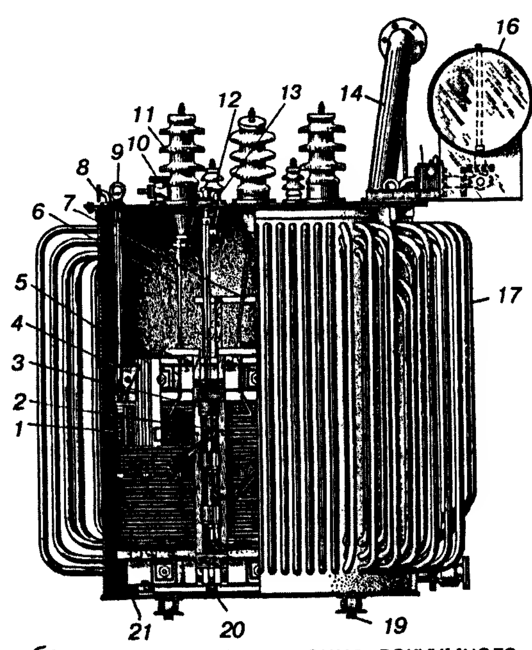


Рис. 16.13 Трансформатор с трубчатым баком:

1— обмотка ВН; 2 — обмотка НН; 3 — переключатель регулировочных отводов обмотки ВН; 4 — балка, прессующая ярмо; 5 — шихтованный магнитопровод; 6 — отводы ВН; 7 — отводы НН; 8 — патрубок для присоеди- нения вакуумного насоса; 9 — кольцо для поъема выемной части; 10 — кран для масла; 11 — ввод (изолятор)

Трансформаторы мощностью более 75 кВА имеют расширитель. Масло при нагревании увеличивается в объеме, из-за чего изменяется его уровень.

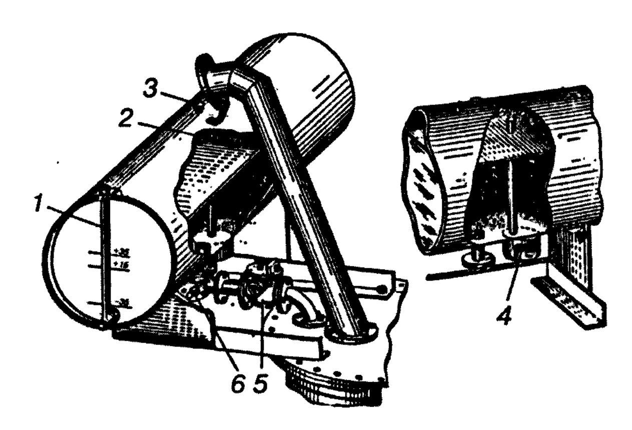


Рис. 16.14. Расширитель и выхлопная труба трансформатора:

1 — указатель уровня масла; 2 — труба для свободного обмена воздуха; 3 — пробка для заливки масла; 4 — грязеотстойник; 5 — газовое реле; 6 — кран для отсоединения расширителя

Колебания уровня масла происходят в расширителе *16*, сообщающимся с атмосферой. При аварии возможно интенсивное выделение газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака. Поэтому во избежание повреждения бака на его крышке устанавливают выхлопную трубу *14*. Нижний конец трубы сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем (рис. 16.14). На фланце закреплен стеклянный диск. При превышениии давления стеклянный диск лопается и избыток газов выходит в атмосферу.

Продолжение рис. 16.13.

ВН; 12 — ввод (изолятор) НН; 13 — привод переключателя; 14 — выхлопная труба; 15 — газовое реле; 16 — расширитель; 17 — трубчатый бак; 18 — кран для спуска масла; 19 — транспортный ролик; 20 — вертикальная шпилька для стягивания прессующих балок ярам; 21 — упорный угольник на дне бака

Кроме того, на крышке бака расположенно газовое реле. При выделенни газов реле срабатывает и отключает цепи управления выключателя трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия трансформатора?
2. Какие паспортные данные имеются на табличке, укрепленной на трансформаторе ?
3. Какие способы охлаждения применяются в трансформаторах ?
4. Какова конструкция магнитопровода ?
5. Какие виды обмоток применяют в трансформаторах ?
6. Какие изоляционные материалы применяют в обмотках ?

Глава 17.

Режимы работы трансформаторов

17.1. Общие сведения

В соответствии с действующими стандартами обозначения начал и концов обмоток трансформаторов приведены в таблице 17.1

Таблица 17.1.

Наименования обмоток	Однофазные	Трехфазные
Обмотки высокого напряжения (ВН):		
начала	A	A, B, C
концы	X	X, Y, Z
Обмотки низкого напряжения (НН):		
начала	a	a, b, c
концы	x	x, y, z
Обмотки среднего напряжения (СН):		
начала	A_m	A_m, B_m, C_m
концы	X_m	X_m, Y_m, Z_m

Обмотки трехфазных трансформаторов в большинстве случаев соединяются по схеме звезды (рис. 17.1), Либо по схеме треугольника (обозначение Δ или *Д*) (рис. 17.2) либо по схеме зигзаг (обозночается λ или *Z*).

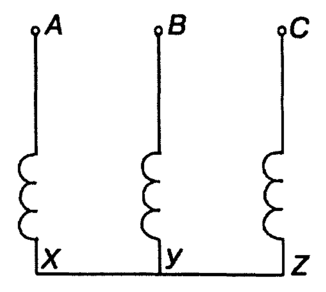


Рис. 17.1. Соединение обмоток трансформатора в «звезду»

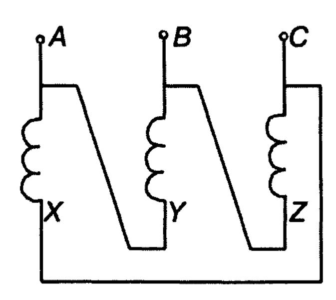


Рис. 17.2. Соединение обмоток трансформатора в «треугольник»

При соединении в звезду линейное напряжение $U_л$ больше фазного $U_ф$: $U_л = \sqrt{3}\ U_ф$, а линейный ток равен фазному. При соединении в треугольник $U_л = U_ф$, а $I_л = \sqrt{3}\ I_ф$. При несимметричном режиме эти соотношения нарушаются.

При соединении обмоток в зигзаг, каждая обмотка разделена на две равные части, размещенные на разных стержнях и соединенные между собой последовательно и встречно (рис 17.3). При встречном включении ЭДС обмотки фазы увеличивается в корень из $\sqrt{3}$ по сравнению с согласным их включением. Однако при встречном включении частей обмотки ее ЭДС будет все же в $2/\sqrt{3} = 1{,}15$ меньше, чем при расположении обеих половин на одном стержне (2Е1). Поэтому расход обмоточного провода при соединении зигзаг увеличивается на 15%. Вследствии этого соединение зигзаг применяется только в специальных случаях при несимметричной нагрузке.

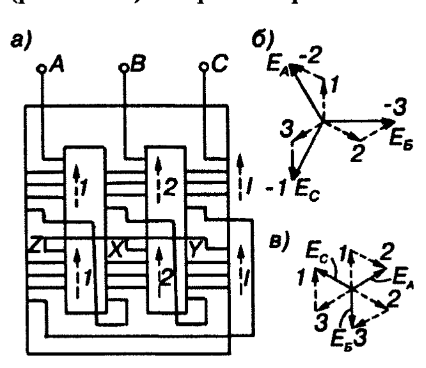


Рис. 17.3. Соединение трехфазной обмотки зигзагом

17.2. Процессы в трансформаторе при Х.Х

Под холостым ходом трансформатора понимают такой его режим работы, когда к первичной обмотки подводится напряжение U_1, а вторичная разомкнута ($I_2 = 0$)

Под действием приложенного напряжения по первичной обмотке протекает ток $I_1 = I_0$, составляющий 5–10% от номинального. Его можно разложить на две составляющие: активную $I_{оа}$ и реактивную $I_о$.

$$I_о = \sqrt{I_{оа}^2 + I_{оμ}^2}\ . \tag{17.1}$$

Активную составляющую фазного тока в трехфазном трансформаторе определяют как

$$I_{oa} = P_0 / 3U_1 ; \qquad (17.2)$$

в однофазном

$$I_{oa} = P_0 / U_1 ; \qquad (17.3)$$

Активная мощность P расходуется на покрытие потерь в трансформаторе.

Реактивная составляющая тока $I_{o\mu}$ создает основной магнитный поток и совпадает с ним по фазе.

Величина намагничивающего тока зависит от магнитных свойств материала магнитопровода.

На рис. 17.4. показаны магнитные характеристики стали. Чем больше магнитная проницаемость стали, тем выше пройдет магнитная характеристика. При более высокой магнитной прони-

Рис. 17. 4. Кривые намагничивания ферромагнитных материалов:

1 — электротехническая сталь 1411, 1511; 2 — малоуглеродистая литая сталь, стальной прокат и поковки для электрических машин; 4 — листовая сталь толщиной 1–2 мм для полюсов; 5 — сталь 10; 6 — сталь 30; 7 — холоднокатанная электротехническая сталь 3413; 8 — серый чугун с содержанием: С – 3,2%, Si – 3,27%; Mn – 0,58%; P – 1,05%; I×A — масштабы по осям, I и A; II×B —масштабы но осям II и B

цаемости можно увеличить магнитную индукцию и уменьшить поперечное сечение магнитопровода, что, в свою очередь, уменьшает массу магнитопровода и обмоток трансформатора.

Магнитный поток трансформатора, созданный реактивным током, имеет две состовляющие: основной магнитный поток Φ, замыкающийся по магнитопроводу и поток рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$, магнитные линии которого пронизывают только витки первичной обмотки и замыкаются по воздуху. Поток $\Phi_{\sigma 1}$ индуктирует в первичной обмотке ЭДС $E_{\sigma 1}$ рассеяния

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_r x_1 , \qquad (17.4)$$

где x_1 — индуктивное сопротивленне первичной обмотки.

Запишем уравнение по второму закону Кирхгофа для первичной обмотки трансформатора

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E} = \dot{I}_0 r_1 \qquad (17.5)$$

откуда

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 r_1 + j\dot{I}_0 x_1 \qquad (17.5,\ a)$$

Магнитный поток рассеяния, замыкающийся по воздуху, встречает большое магнитное сопротивление, поэтому очень мал по сравнению с основным магнитным потоком ($\Phi_{\sigma 1} \ll \Phi_{max}$)

Поэтому ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$ очень мала по сравнению с ЭДС E_1 ($E_{\sigma 1} \ll E_1$). Следовательно, составляющими уравнения (17.5, *а*) $I_0 r_1$ и $j\, I_0 x_1$ можно пренебречь

$$U \approx -E_1, \qquad E_2 = U_{20}$$

тогда

$$k = E_1 / E_2 = U_1 / U_2 . \qquad (17.6)$$

Таким образом при холостом ходе можно определить коэффициент трансформации.

Потери в стали $P_{ст}$ трансформатора пропорциональны амплитудному значению B_m во второй степени.

$$P_{ст} = P_0 = B_m^2 = \Phi_m^2 = E_1^2 . \qquad (17.7)$$

Потери в меди обмоток пропорциональны току во второй степени

$$P_м = I_0^2 r. \quad (17.8)$$

Как указывалось выше, ток холостого хода I_0 очень мал, поэтому потерями в меди можно пренебречь. Следовательно при опыте холостого хода определяют потери в стали.

17.3. Приведенный трансформатор

Параметры первичной и вторичной обмоток трансформатора могут сильно отличаться. Например, на первичную обмотку тягового трансформатора подается 25000 В, а с обмотки собственных нужд снимается 380 В. Если построить векторную диаграмму в масштабе 1 см 1000 В, то вектора ЭДС будут иметь длину: для первичной обмотки — 250 см, а для вторичной — 0,38см, что вызовет несомненные неудобства. Указанные затруднения устраняются пересчетом всех параметров трансформатора к одинаковому числу витков, наиболее часто к числу витков первичной обмотки w_1. Все пересчитанные величины, относящиеся к пересчитанной вторичной обмотке, называются приведенными и обозначаются теми же символами, что и действительные величины, но со штрихом сверху: E_2'; U_2'; I_2'; r_2' и т.д.

Таким образом, реальный трансформатор с коэффициентом трансформации $к = w_1/w_2$ заменяем на эквивалентный трансформатор с $к = w_1/w_2' = 1$, где $w_2' = w_1$. Полученный трансформатор называют *приведенным*. Однако, результаты пересчета не должны отразиться на энергетических показателях трансформатора, т.е. мощность, магнитный поток и фазовые сдвиги во вторичной обмотке должны остаться без изменения.

Электромагнитная мощность вторичной обмотки реального трансформатора $E_2 I_2$ должна быть равна электромагнитной мощности вторичной обмотки приведенного трансформатора

$$E_2 I_2 = E_2' I_2' \quad (17.9)$$

Подставив значение приведенного тока: $I_2' = I_2 W_2/W_1$, получим формулу приведенной вторичной ЭДС:

$$E_2' = E_2 I_2 / I_2' = E_2 I_2 / I_2 (W_1 / W_2) = E_2 k \,. \qquad (17.10)$$

Таким же образом изменяются и другие величины, имеющие такую же размерность, как ЭДС:

$$E_{2\sigma}' = \mathrm{E}_{2б}\mathrm{k} \,; \qquad (17.11)$$

$$I_2' X_2' = I_2 X_2 k \,; \qquad (17.12)$$

$$I_2' r_2' = I_2 r_2 k \,; \qquad (17.13)$$

$$U_2' = U_2 k \,. \qquad (17.14)$$

Приведенный ток вторичной обмотки:

$$I_2' = I_2 w_2 / w_1 = I_2 / k \,. \qquad (17.15)$$

Приведенные сопротивления вторичной обмотки

$$r_2' = (I_2 / I_2')^2 r_2 = k^2 r_2 \,; \qquad (17.16)$$

$$x_2' = x_2 k^2 \,; \qquad (17.17)$$

$$z_2' = z_2 k^2 \,. \qquad (17.18)$$

С помощью приведенных величин можно построить схемы замещения приведенного трансформатора (рис. 17.5, *а*, *б*).

На рис. 17.5, *а* представлена схема замещения обмоток сопротивлениями. В схеме сопротивления r и x условно вынесены из собственных обмоток и включены последовательно этим обмоткам.

В приведенном трансформаторе $к = 1$ и $E_1 = E_2'$. Поэтому в схеме (рис. 17.5, *б*) точки *с* имеют одинаковые потенциалы, что позволяет электрически соединить указанные точки, получив Т-образную схему приведенного трансформатора (рис. 17.5, *в*). В электрической схеме замещения трансформатора магнитная связь между цепями замещения заменена электрической, что значительно упрощает схему.

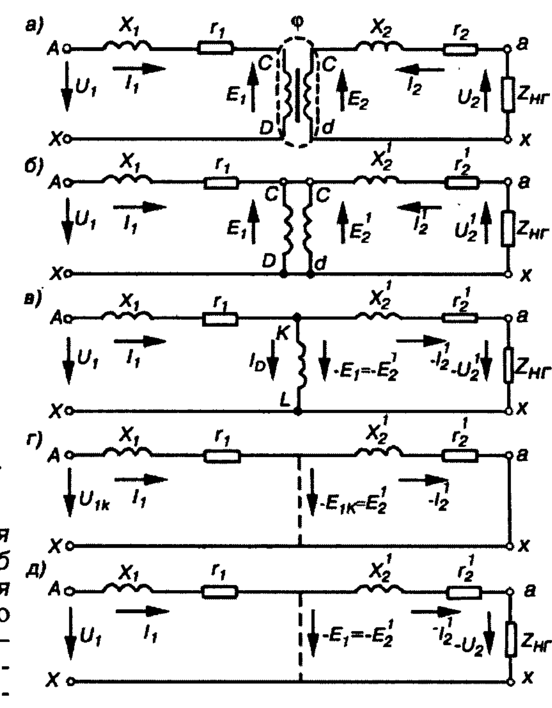


Рис. 17.5. Схемы замещения трпнсформатора:

а — схема замещения отдельных обмоток; б — схема замещения обмоток приведенного транс- форматора; в — Т-образная схема замещения; г — схема замещения при коротком замыкании; д — упращенная схема замещения при перегрузке

17.4. Опыт короткого замыкания трансформатора

Короткое замыкание в трансформаторе возникает обычно вследствии каких-либо неисправностей, например, при повреждении изоляции, ее пробое или ошибочных действиях обслуживающего персонала. При к.з. возникают большие токи в 10–15 раз превышающие номинальные, вызывающие ударные динамические нагрузки, нагрев и повреждение изоляции.

При опыте к.з. вторичную обмотку закорачивают и к трансформатору подводят пониженное напряжение такой величины, чтобы токи в обмотках были равны номинальным или близки к

нему. Напряжение обычно составляе 3–15% от номинального значения. Схема для проведения опыта к.з. показана на рис. 17.6. Величина напряжения к.з. приводится в паспорте трансформатора.

Из опыта короткого замыкания определяют потери и напряжение короткого замыкания, а также другие параметры.

При понижении напряжения уменьшится и магнитный поток Φ, что вызовет уменьшение намагничивающего тока. В этом случае уравнения трансформатора при к.з. имеют вид

$$\dot{U}_{1k} - \dot{E}_{1k} = \dot{I}_{1k} Z_1 ; \tag{17.19}$$

$$\dot{E}'_{2k} - \dot{I}'_{1k} Z'_k = 0 ; \tag{17.20}$$

$$\dot{I}_{1k} + \dot{I}'_{2k} = 0 \tag{17.21}$$

Из (17.21) следует, что при коротком замыкании токи в обмотках приведенного трансформатора равны, но противоположны по направлению $I_{1k} = -\dot{I}'_{2k}$.

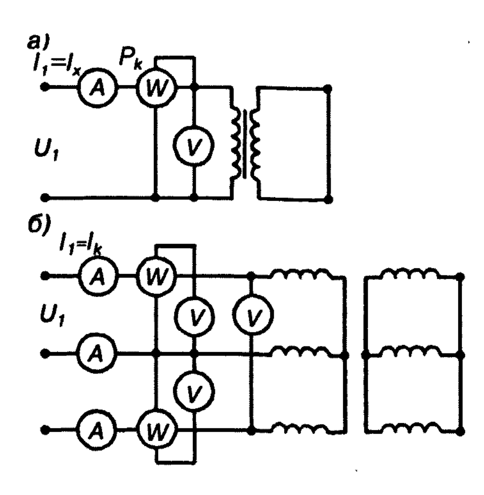


Рис. 17.6. Схемы опытов короткого замыкания однофазного (а) и трехфазного (б) двухобмоточного трансформаторов

17.5. Эквивалентная схема трансформатора при опыте к.з. и упрощенная векторная диаграмма

При к.з. зажимов вторичной обмотки сопротивление нагрузки $Z_н = 0$, и следовательно, напряжение U_1, приложенное к первичной обмотке, будет уравновешиваться падением напряжения в первичной и вторичной обмотках трансформатора. Эквивалентная схема для одной фазы показана на рис. 17.5, *г*.

Уравнения равновесия ЭДС первичной обмотки трансформатора при к.з. вторичной обмотки имеет вид $U_1 = I_k z_k$, где I_k — ток к.з.

Построим упрощенную векторную диаграмму при к.з (рис. 17.7). В положительном направлении направим вектор тока I_k. С ним совпадает по фазе вектор активного падения напряжения $I_k r_k$. Вектор индуктивного падения напряжения $j\dot{I}_k x_k$ н $\pi/2$ повернут. Геометрическая сумма векторов $\dot{I}_k r_k$ и $j\dot{I}_k x_k$ дает вектор приложенного к первичной обмотке напряжения. Таким образом ток короткозамкнутого трансформатора $\dot{I}_k = \dot{U}_1/Z_k$.

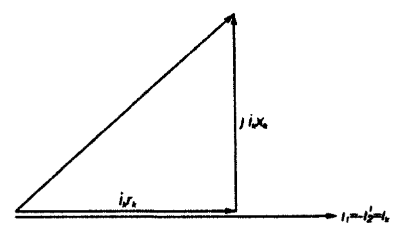


Рис. 17.7. Треугольник короткого замыкания

Как указывалось выше, при опыте к.з. вторичную обмотку трансформатора замыкают накоротко, а к первичной подводят такое пониженное напряжение U_k, при котором в обмотках трансформатора протекают номинальные токи. Это напряжение называют напряжением короткого замыкания. Оно измеряется в процентах от номинального $u_к = (U_k/U_{ном})100\%$.

Согласно ГОСТ 11677 напряжение к.з. составляет 5,5–10,5%. При столь малом напряжении намагничивающий ток и магнитный поток очень малы. Поэтому очень малыми будут потери в стали (17.7), которыми можно пренебречь. Потери в меди обмоток $P_к = P_м = I^2_{ном} r_к$, где $I_{ном}$ — номинальный ток первичной обмотки. Таким образом при опыте к.з. можно определить потери в меди обмоток.

17.6. Работа трансформатора под нагрузкой

Работа трансфоматора под нагрузкой подчиняется тем же законам, что и работа в режимах х.х. и к.з.. Эти зависимости выражаются в форме уравнений напряжений, ЭДС и МДС, или могут быть изображены с помощью векторных диаграмм.

При нагрузке по обмоткам протекают токи: по первичной — ток I_1, а по вторичной — ток I_2. Уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 \,. \qquad (17.22)$$

При холостом ходе МДС $I_0 w_1$ создает основной магнитный поток трансформатора $\Phi_{max,}$который индуктирует ЭДС E_1. Падение напряжения в полном сопротивлении первичной обмотки $I_1 z_1$ очень мало в сравнении с приложенным напряжением, поэтому можно считать что приложенное напряжение уравновешивается ЭДС первичной обмотки, т.е. $U_1 \approx -E_1$. Следовательно, при неизменном напряжении сети будет неизменна как ЭДС E_1, так и амплитуда магнитного потока Φ_{max} при любой нагрузке.

При холостом ходе МДС $I_0 w_1$ создает основной магнитный поток трансформатора Φ_{max} который индуктирует ЭДС E_1 в первичной и ЭДС E_2 во вторичной обмотках При замыкании вторичной обмотки на сопротивление нагрузки $Z_н$, по ней будет протекать ток I_2. МДС вторичной обмотки $I_2 w_2$ будет направлена встречно магнитному потоку Φ_{max} ее создающему, стремясь уменьшить его. Но при уменьшении магнитного потока уменьшится и ЭДС E_1, что ведет к увеличению тока первичной обмотки. *Ток увеличивается до такой величины при которой МДС первичной обмотки $I_1 w_1$ компенсирует размагничивающее действие МДС $I_2 w_2$ вторичной обмотки.*

Таким образом, уравнение равновесия МДС можно записать в следующем виде

$$I_1 w_1 + I_2 w_2 = I_0 w_1 \qquad (17.23)$$

тогда разделив правую и левую части уравнения на w_1 получим

$$\dot I_1 = \dot I_0 + (-\dot I_2'),\qquad (17.23,\ a)$$

где $I_2' = I_2 w_2/w_1 = I_2/k$.

Запишем уравнение ЭДС для вторичной обмотки (рис. 17.1)

$$\dot E_2' - \dot E_{\sigma 2}' = \dot I_2' r_2 + \dot I_2' z_H$$

$$\dot I_2' z_H' = \dot U_2'; \qquad \dot E_{\sigma 2}' = -j\,\dot I_2' x_2',$$

тогда

$$\dot U_2' = \dot E_2' - \dot I_2' r_2' - j\,\dot I_2' x_2'. \qquad (17.24)$$

17.7. КПД трансформатора

Мощность P_1, подаваемая на первичную обмотку трансформатора, не равна мощности P_2, снимаемой со вторичной обмотки. Часть мощности теряется в трансформаторе и в соответствии с законом сохранения энергии преобразуется в теплоту.

КПД трансформатора представляет собой отношение полезной мощности, отдаваемой трансформатором в нагрузку, к мощности, потребляемой им из сети

$$\eta = (P_2/P_1)100\%; \qquad (17.25)$$

$$P_1 - P_2 = \Delta P; \qquad (17.26)$$

где ΔP — сумма потерь в трансформаторе.

Подставив (17.26) в (17.25) получим

$$\eta = P_2/(P_2 + \Delta P)100\% = [1 - \Delta P/(P_2 + \Delta P)]100\%. \qquad (17.27)$$

Выразим изменение нагрузки трансформатора через коэффициент нагрузки

$$K_{нг} = I_1/I_{ном};\ P_2 = K_{нг} P_{2ном}\cos\varphi_2,$$

где I_1 — ток первичной обмотки при выбранной нагрузке;
$I_{ном}$ — номинальный ток первичной обмотки;
$P_{2ном}$ — номинальная мощность трансформатора.

Потери мощности в трансформаторе — это потери в меди и потери в стали

$$\Delta P = P_{ст} + P_{м} . \tag{17.28}$$

Так как при работе трансформатора частота тока сети и амплитуда магнитной индукции неизменны, то потери в стали постоянны, они не зависят от нагрузки трансформатора и равны потерям холостого хода

$$P_{ст} = P_0 . \tag{17.29}$$

Потери в меди зависят от тока нагрузки и являются переменными потерями $P_м = I_1^2 r_k$, или, так как $I_1 = K_{нг} I_{ном}$, то

$$P_м = K_{нг}^2 I_H^2 r_k = K_{нг}^2 P_{кз} , \tag{17.30}$$

где $P_{кз}$ — мощность, потребляемая трансформатором при коротком замыкании и расходуемая на покрытие потерь при номинальном токе

$$\eta = [1-(P_с+P_м)/(P_2+P_с+P_м)]100\% =$$

$$=[1-(P_о+K_{нг}^2 P_{кз})/(P_{2ном} K_{нг} \cos\varphi_2 + P_о K_{нг}^2 P_{кз})]100\% . \tag{17.31}$$

Практически КПД трансформатора очень высок. Так, для трансформаторов малых мощностей (до 1000 ВА) КПД составляет 85–95%; для трансформаторов больших мощностей — 95–99,5%.

17.8. Внешние характеристики трансформатора

Под *внешней* характеристикой трансформатора понимают зависимость напряжения на выводах вторичной обмотки U_2 от тока этой обмотки I_2 при условии, что $\cos\varphi$, первичное напряжение U_1 и частота f постоянны (рис. 17.8).

При холостом ходе, когда $I_2 = 0$, напряжение на выводах вторичной обмотки равно ЭДС этой обмотки E_{20}. Как уже было сказано, что напряжение для вторичной обмотки при $U_{1ном}$

принимается за номинальное $E_{20} = U_{2ном}$.

При нагрузке трансформатора появляется ток во вторичной обмотке и увеличивается ток в первичной обмотке. Эти токи вызывают падение напряжения в обмотках, в результате чего напряжение на выводах вторичной обмотки будет изменяться. Если пренебречь намагничивающим током I_0 вследствии его относительной малости, то в режиме нагрузки схему замещения трансформатора можно представить в упрощенном виде (рис. 17.9). Исходя из этой схемы можно записать

$$-U_2 = U_1 - I_1 Z_k .$$

По этому уравнению на рис. 17.10 построены векторные диаграммы: при активно-индуктивной и активно-емкостной нагрузках. Из диаграмм следует, что вторичное напряжение зависит от характера нагрузки: по сравнению с холостым ходом при активно-индуктивной нагрузке с ростом тока I_2 напряжение уменьшается, а при активно-емкостной может увеличиваться. Арифметичес-

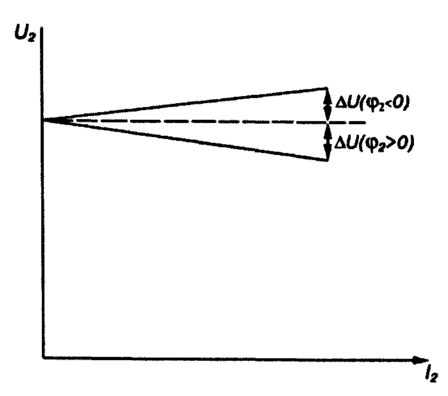


Рис. 17.8. Внешние характеристики трансформатора

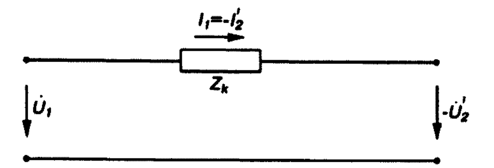


Рис. 17. 9. Упрощенная схема замещения трансформатрра в режиме нагрузки

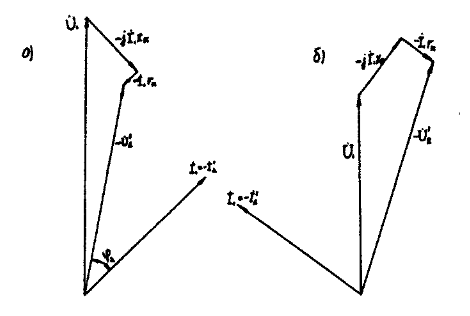


Рис. 17.10 Векторные диаграммы трансформатора при активно-индуктивной (а) и активно-емкостной (б) нагрузках

кая разность вторичных напряжений при холостом ходе и токе I_2 называется *изменением напряжения трансформатора.* Его принято выражать в процентах номинального напряжения:

$$\Delta U\% = (\Delta U / U_{2н})100 = [(U_{2н} - U_2)/U_{2н}]100 =$$

$$= [(U_{1н} - U_2')/U_{1н}]100 .$$

Значение $\Delta U\%$ можно найти, осуществляя непосредственно нагрузки трансформатора.

Контрольные вопросы

1. Почему с увеличением тока нагрузки трансфоматора увеличивается ток в его первичной обмотке?
2. Что такое приведенный трансформатор?
3. Будет ли изменяться ток хх и как при увеличении или уменьшении сечения стержней магнитопровода?
4. На что расходуется активная мощность, потребляемая трансформатором при опытах х.х. и к.з.?
5. Как опытным путем определить напряжение к.з. трансформатора?
6. Почему при включении нагрузки уменьшается напряжение на вторичной обмотке?
7. От каких параметров зависит КПД трансформатора?

Глава 18.

Тяговые трансформаторы

18.1. *Общие сведения*

Назначение тяговых трансформаторов. Тяговые трансформаторы предназначены для понижения напряжения контактной сети до уровня, необходимого для регулирования частоты вращения тяговых электродвигателей, а следовательно,и скорости движения электроподвижного состава (электровозов и электропоездов переменного тока).

Условия работы тяговых трансформаторов. Тяговые трансформаторы, в отличие от стационарных, должны работать в более тяжелых условиях: при изменении напряжения в контактной сети от 19 до 29 кВ; при вибрациях с частотой от 1 до 100 Гц; при высоте над уровнем моря — при климатическом исполнении УХЛ до 1400 м; при температуре окружающего воздуха от +60 до –60°С; относительной влажности воздуха при температуре 20°С до 90%. Срок службы трансформаторов до 25 лет, а трансформатора ОНДЦЭ до 33 лет.

Разновидности тяговых трансформаторов. На электроподвижном составе переменного тока применяют тяговые трансформаторы трех типов: с регулированием на стороне низшего напряжения; с регулированием на стороне высшего напряжения, с постоянным коэффициентом трансформации.

Трансформаторы с регулированием на стороне высшего напряжения, как правило, состоят из двух совмещенных трансформаторов: (автотрансформатора и трансформатора с постоянным коэффициентом трансформации), имеющих единый магнитопровод.

Тяговые трансформаторы с постоянным коэффициентом трансформации применяют лишь на электровозах двойного питания.

Основные технические данные тяговых трансформаторов приведены в приложении.

18.2. Согласное и встречное включение обмоток тягового трансформатора

Способы регулирования напряжения, применяемые на электровозах постоянного тока, посредством пусковых реостатов, имеют ряд серьезных недостатков. В пусковых резисторах значительная доля энергии превращается в тепло, и это существенно снижает КПД электровоза. Кроме того, резисторы, рассчитанные на значительную мощность, имеют большие габариты. Из-за нагрева ограничивается допустимая продолжительность использования реостатных ступеней регулирования. При последовательном и последовательно-параллельном соединениях двигателей тяговые свойства электровоза намного хуже, чем при параллельном соединении. Боксование колесных пар электровозов в случае последовательного и последовательно-параллельного соединения двигателей более глубокое, и восстановить сцепление значительно труднее, чем при параллельном соединении.

Из формулы частоты вращения ТЭД $n = (U - Ir)/C_e\Phi$, видно, что частоту вращения можно регулировать изменением напряжения и ослаблением возбуждения. Кроме того,можно ограничивать пусковые токи, уменьшением напряжения, подаваемого на ТЭД.

На электровозах переменного тока регулирование напряжения осуществляют путем изменения коэффициента трансформации тягового трансформатора, а также многообмоточные трансформаторы (ОНДЦЭ-1000/25-82) с тиристорным регулированием.

Из рис. 18.1 видно, что тяговых обмоток четыре, из них две обмотки a_1-x_1 и a_2-x_2 не имеют ответвлений, но имеют большое количество витков и, следовательно в них, индуктируется большая ЭДС, чем в обмотках, разделенных на секции (секционированных) *01-1* и *02-5*. Секционированные обмотки имеют

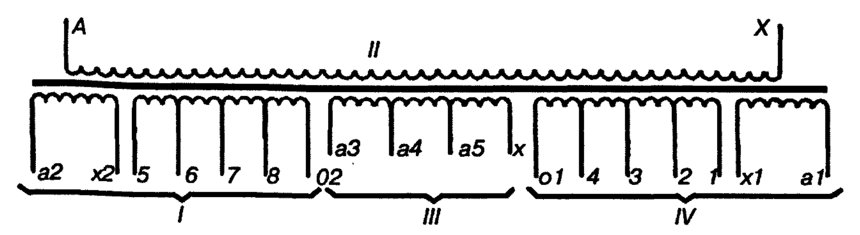


Рис. 18.1. Схема обмоток тягового трансформатора

меньшее количество витков. Они разделены на четыре секции, имеющие одинаковое количество витков.

При пуске в ход на ТЭД необходимо подавать низкое напряжение. Так, для электровоза ВЛ60[к] оно составляет 42 В, при напряжении в контактной сети 25 кВ А, максимальное напряжение, подаваемое на ТЭД, при том же напряжении в контактной сети, составляет 2060 В (33 позиция контроллера машиниста). Для понижения напряжения тяговым трансфор-матором его секционираванные части подключают встречно к несекционираванным частям (рис. 18.2). ЭДС всех вторичных обмоток в одну часть полупериода направлена в одну сторону, как это показано на рис.18.2, а в другую часть полупериода — в противоположную. Ток несекционированной обмотки совпа-дает по направлению с ЭДС, а в несекционированной обмотке направлен в противоположную сторону.

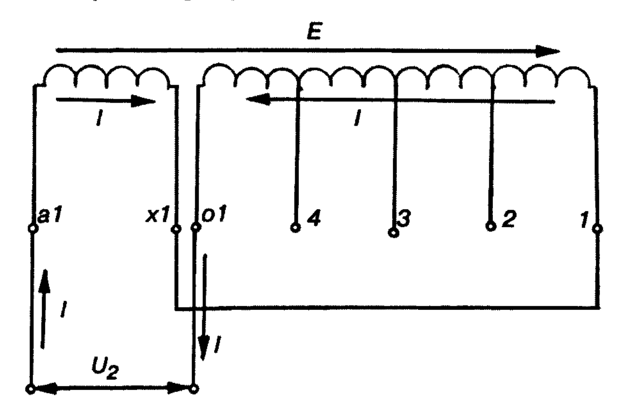


Рис. 18.2. Встречное включение тяговых обмоток трансформатора

Следовательно, напряжение U_2 равно разности ЭДС несекционированной и четырех встречно включенных секций

$$U_2 = E_{a1\text{-}x1} - E_{01\text{-}1} . \qquad (18.1)$$

Чтобы увеличить напряжение U_2, подаваемое на ТЭД, на последующих ступенях регулирования уменьшают количество

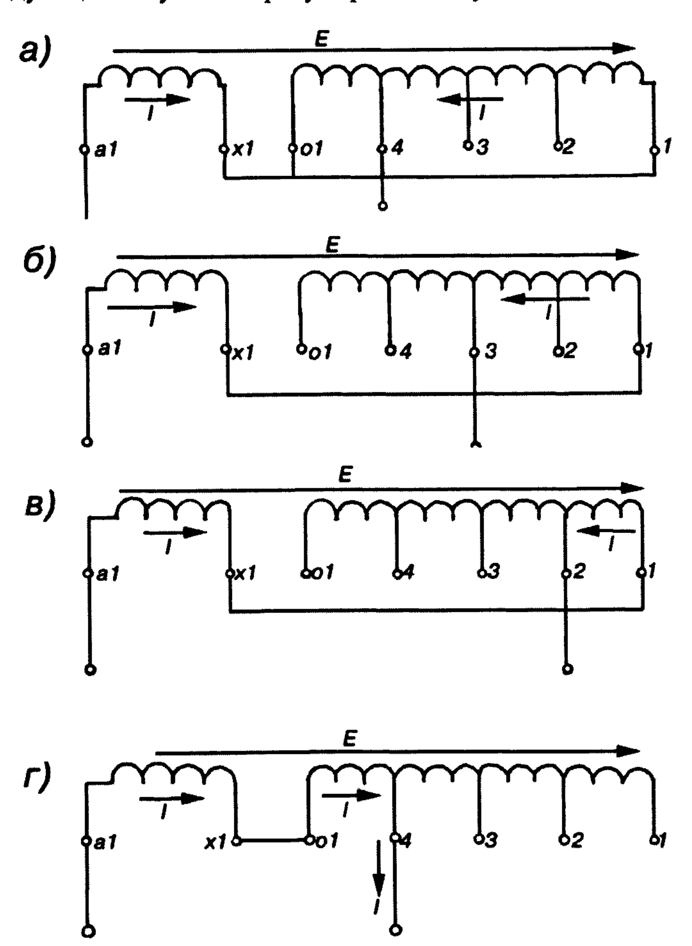


Рис. 18.3. Регулирование напряжения тяговым трансформатором: а, в, б, — встречное включение обмоток; г — согласное включение

встречно включеных секций (рис. 18.3, *а*, *б*, *в*). В этом случае $E_{01\text{-}1}$ уменьшается, вследствие чего напряжение U_2 увеличивается. На 5-й ступени встречно включено по три секции; на 9-й — по две; на 13-й — по одной, а на 17-й в работе остается нерегулируемая часть тяговой обмотки трансформатора. То же относится к двум другим обмоткам a_2-x_2 и *02-5*.

На последующих более высоких позициях к нерегулируемым обмоткам секции регулируемых обмоток подключают согласно. На 21-й позиции подключена одна секция (рис. 18.3, *г*), на 25-й — по две, на 29-й — по три и на 33-й — по четыре секции. Следовательно, напряжение на тяговых двигателях зависит от того, сколько секций и в каком направлении подключено к нерегулируемой обмотке трансформатора.

18.5. Процесс переключения секций трансформатора

При переключении с одной позиции на другую ток не должен прерываться, т.е. тяговые двигатели должны получать питание непрерывно. На рис. 18.4 изображена последовательность переключения контактов под

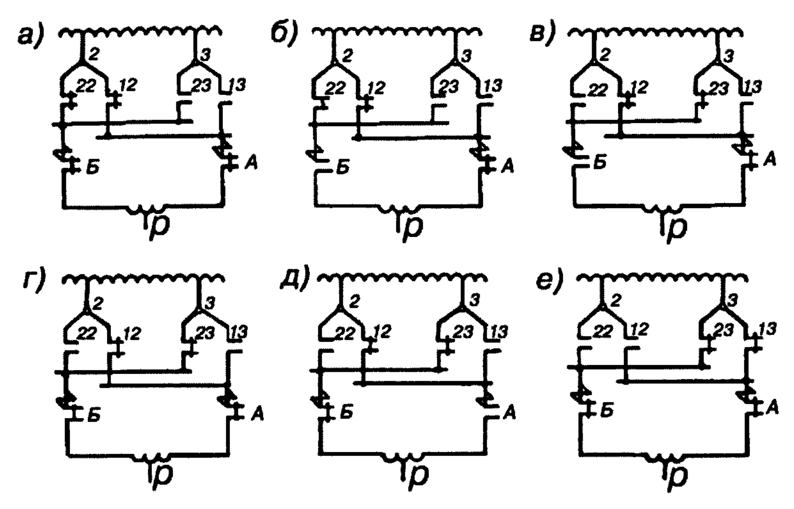


Рис. 18.4. Схемы включения переходного реактора в процессе переключения

нагрузкой. Переключающее устройство (на электровозе переменного тока эту функцию выполняет главный контроллер ЭКГ-8) состоит из переходных реакторов *Р* (их два), четырех контакторов с дугогашением контактами *А, Б, В, Г*. Будем рассматривать процесс переключения только в одной регулируемой обмотке тягового трансформатора.

На ходовой позиции все четыре контакта *А*, *Б*, *12* и *22* замкнуты. Замкнутые контакты *12*, *22* закорачивают переходной реактор *Р*. Ток от ответвления тягового трансформатора по двум параллельным ветвям подводится к переходному реактору. При переключении позиции под током контакт *Б* переключается на ответвление и секция тягового трансформатора между ответвлениями *2* и *3* оказывается замкнутой накоротко. Однако ток в закороченной секции трансформатора не достигает большого значения, так как он ограничивается индуктивным сопротивлением переходного реактора *Р*.

На ходовой позиции переходной реактор подключен к ответвлению *2* через контакты с дугогашением *А*, *Б* и без дугогашения *12*, *22*. Контакты *А*, *Б* могут замыкаться и размыкаться под током, так как оборудованы устройствами дугогашения. Контакты цифровые *11*, *12*, *22* и т.д. замыкаются только в обесточенном состоянии. Всякий переход на другую позицию начинается с отключения дугогасительного контакта, например, *Б* (рис. 18.4, *б*), при этом контактор *22* обесточивается и цепь контакторов *22*, *23* оказывается отсоединенной от цепи переходного реактора. Контактор *Б* находится в отключенном состоянии кратковременно — только тот промежуток времени, который необходим для размыкания контактора *23* (рис. 18.4, *в*). Следует обратить внимание на то, что недопустимо одновременное включение контакторов *22* и *23*. Вначале обязательно должен разомкнуться контактор *22* и только после этого может замкнуться контактор *23*. Если же их замкнуть одновременно, то произойдет глухое короткое замыкание секции тягового трансформатора, что приведет к его выходу из строя. Поэтому после переключения контакторов *22* и *23* контактор *Б* опять включается (рис. 18.4, *г*) и подсоединяет реактор к секции трансформатора. Через реактор протекает ток, состоящий из тока нагрузки и циркуляционного тока. Результирующий ток значителен, особенно при больших токах

тяговых электродвигателей. Вследствие этого реактор может перегреться поэтому не рекомендуется длительная езда на переходных позициях.

Далее контактор с дугогашением *А* отключается (рис. 18.4, *д*). После его отключения контакторы *12* и *13* будут также отключеным от цепи реактора Р. Контактор *А* в отключенном состоянии находится непродолжительное время. За это время вначале отключится контактор *12*, и затем включится контактор *13*, после этого контактор *А* включится вновь и переходной реактор окажется подключенным к ответвлению *3* тягового трансформатора.

Таким образом осуществляется переключение трансформатора на последующие ответвления без разрыва цепь питания тяговых электродвигателей.

18.4. Типы тяговых трансформаторов, применяемых в ТПС

На электровозах ВЛ60^к, ВЛ60^п установлены трансформаторы типа ОЦР-5600/25; ВЛ80^к — типа ОЦР-5000/25; ВЛ80^т, ВЛ80^с — ОДЦЭ-5000/25Б; ВЛ82 и ВЛ82^м — типа ОДЦЭ-4000/25; ВЛ85 — ОНДЦЭ — 10000 /25-82 (рис. 18.5).

В обозначениях типов трансформаторов буква О указывает на число фаз (однофазный), Ц — на принудительную циркуляцию масла, Д — на принудительное дутье, Р — на назначение трансформаторов (питание ртутных выпрямителей), Э — на принадлежность к электровозу, Н — направленный поток масла. Числитель дроби означает типовую мощность трансформатора в киловольт-амперах (кВА), знаменатель — номинальное напряжение на первичной обмотке в киловольтах (кВ).

18.5. Конструкция основных узлов тяговых трансформаторов

Тяговые трансформаторы состоят из активной части и бака с арматурой, а также системы охлаждения. Активная часть состоит из магнитопровода и обмоток.

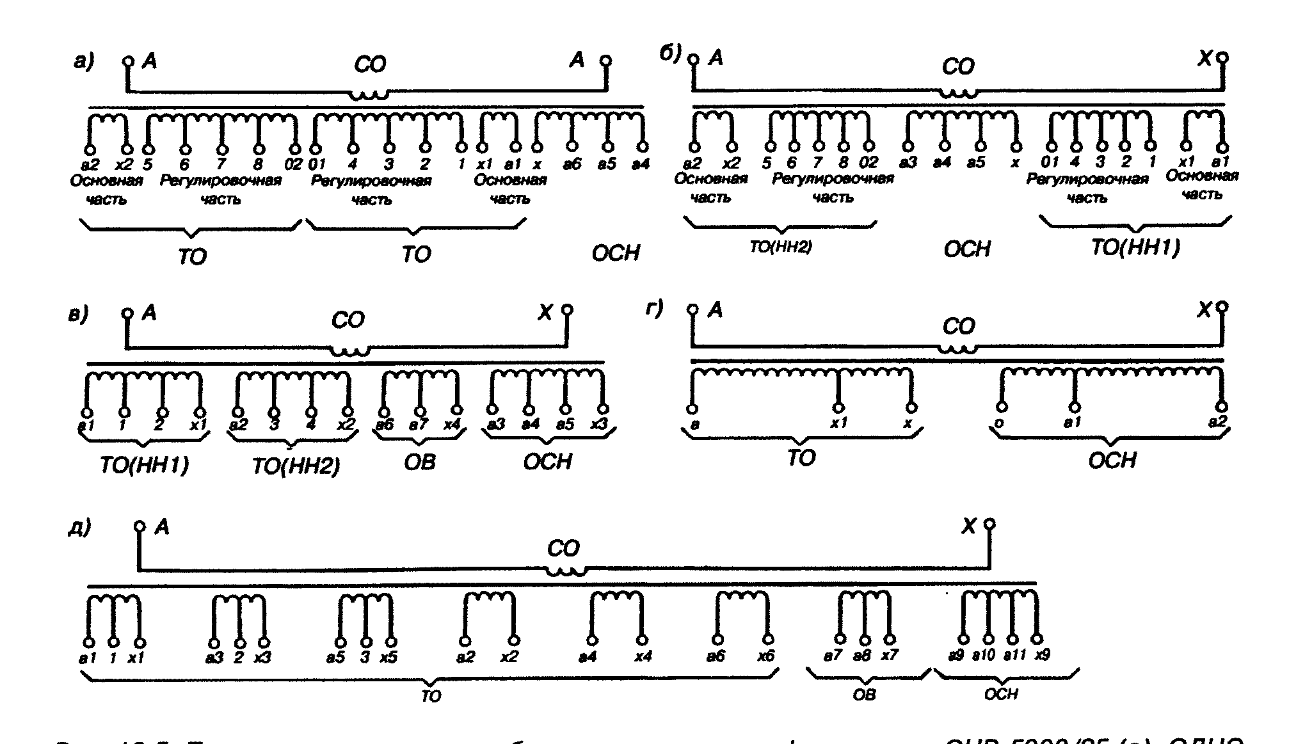


Рис. 18.5. Принципиальные схемы обмоток тяговых трансформаторов ОЦР-5000/25 (а), ОДЦЭ-5000/25Б (б), ОДЦЭ-5000/25АМ (в), ОДЦЭ-4000/25АМ (г) и ОНДЦЭ-10000/25-82 (д):

ТО (НН1 и НН2) —тяговые обмотки; СО — обмотка сетевая; ОСН — обмотка собственных нужд; ОВ — обмотка возбуждения

18.5.1. Магнитопровод

Стержневые магнитопроводы используют в трансформаторах с регулированием напряжения на вторичной стороне, а броневые магнитопроводы, применяются при регулировании напряжения на первичной стороне.

В отечественных электровозах применяют регулирование напряжения на вторичной стороне, а в электровозах серий ЧС4, ЧС4т,ЧС8 применяют регулирование напряжения на первичной стороне.

Стержневые магнитопроводы в свою очередь бывают шпилечной (рис. 18.6) и бесшпилечной конструкции (рис.18.7).

По способу сборки стержневые магнитопроводы подразделяются на шихтованные, собираемые из отдельных листов впереплет, и шихтованные стыковые, собираемые из отдельных блоков впритык. Шихтованные магнитопроводы, собираемые впереплет, более надежны, в эксплуатации, удобны в производстве и требуют менее сложного оборудования и приспособлений для сборки. Сборка же стыковой конструкции

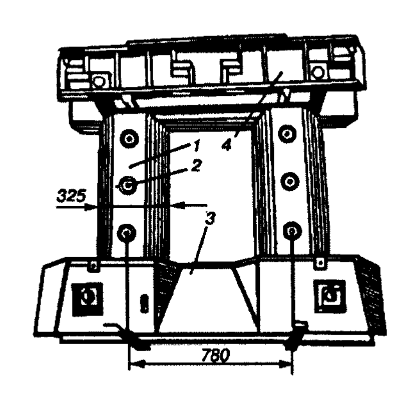


Рис 18.6. Магнитопровод шпилечной конструкции:

1 — стержень; 2 — шпилька; 3 — нижнее ярмо; 4 — верхнее ярмо

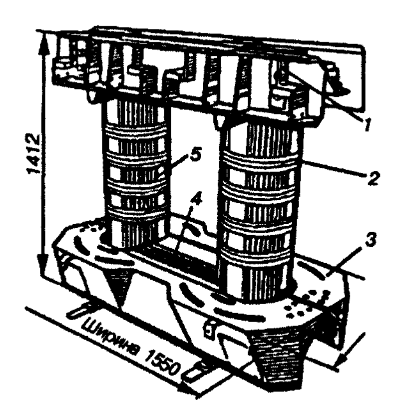


Рис. 18.7. Магнитопровод бесшпилечной конструкции:

1 — верхнее ярмо балки; 2 — бандаж стержня; 3 — нижние ярмовые балки; 4 — ярмо; 5 — стержень

магнитопровода приводит к неточности и нестабильности характеристик.

Стержневые тяговые трансформаторы бывают с вертикальным и горизонтальным расположением стержней. Горизонтальное расположение стержней значительно снижает высоту центра масс над плоскостью закрепления и моменты, вызываемые действием горизонтальных динамических сил. Эти моменты особенно сильно влияют на конструкцию узлов стержней магнитопровода и могут нарушить плотность скрепления частей магнитной системы. Поэтому тяговые трансформаторы с горизонтальным расположением стержней применяют в электропоездах переменного тока и в некоторых новых локомотивах.

В магистральных грузовых электровозах переменного тока чаще всего применяют двухстержневые тяговые трансфор-маторы с вертикальным расположением стержней.

Магнитопроводы изготовляют из рулонной текстурованной стали толщиной 0,35 мм марки 3404–3405 по по ГОСТ 21427.1 с меньшими удельными потерями. Торцы магнитопроводов покрывают грунтом ГФ-020.

Бесшпилечные магнитопроводы стягивают бандажами из нетканых материалов (стеклоленты, пропитанной эпоксидно-полиэфирным составом). В процессе сушки активной части эпоксидно- полиэфирный состав полимеризуется.

Ярмо опрессовывают ярмовыми балками и стальными шпильками. Шпильки изолируют от активной стали бакелитовыми трубками.

18.5.2 Обмотки

В тяговых трансформаторах применяют следующие виды обмоток: непрерывные, дисковые, винтовые и цилиндрические. Их изготавляют из медного провода прямоугольного сечения марки ПБ, изолированного несколькими слоями кабельной бумаги с толщиной изоляции 0,45–0,96 мм.

Обмотку от сердечника, а также обмотки, расположенные концентрично, друг к другу изолируют бакелитовыми цилиндрами. Цилиндры по высоте делают на 35–40 мм больше

обмотки, чтобы удлинить возможный путь электрического разряда по поверхности между обмотками. Для образования в обмотках, а также между ними и изоляционными цилиндрами осевых каналов (для охлаждения обмоток маслом) применяют рейки, склеенные бакелитовым лаком из полос электротех-нического картона.

Непрерывную обмотку применяют в цепях высшего напряжения, а также в регулируемой части тяговой обмотки трансформаторов ОЦР-5600/ 25 и ОЦР-5000/25.

Обмотку высшего напряжения наматывают одним проводом прямоугольного сечения на рейках, укрепленных на бумажно-бакелитовом цилиндре. Она состоит из дисковых катушек, разделенных прокладками. Зазоры между катушками являются каналами системы охлаждения (рис. 18.8).

Количество реек и прокладок по окружности цилиндра зависит от его диаметра. Обычно расстояние между прокладками по окружности равно 150–200 мм. В местах переходов между катушками провод изгибают на ребро. Места перехода изолируют тафтяной лентой, намотанной в полуперекрышу.

Обмотка высшего напряжения состоит из двух частей, расположенных на обоих стержнях магнитопровода. Обе части обмотки соединены параллельно.

Непосредственно у стержней расположены на цилиндрах несекционированные части обоих плеч вторичной обмотки, что облегчает и упрощает изоляцию их от стали сердечника. Затем располагают цилиндр с обмоткой высшего напряжения; и, наконец, третье, наружное концентрическое кольцо составляют секционированные части обоих плеч вторичной обмотки, также собранные на бакелитовых цилиндрах.

Размещение секционированной части вторичных обмоток снаружи облегчает конструктивное и технологическое выполнение отводов от этих обмоток. Отводы изготовлены из медных шин, скрепленных между собой и прикрепленных к основанию деревянными клицами. Отводы от обмотки высшего напряжения выполняют изолированными проводами: они заканчиваются демпферами — набором тонких медных пластин большой гибкости. Обмотка собственных нужд расположена в виде двух двойных дисковых катушек, одна из которых размещена на 1/4; а другая на 3/4 высоты наружного бакелитового цилиндра.

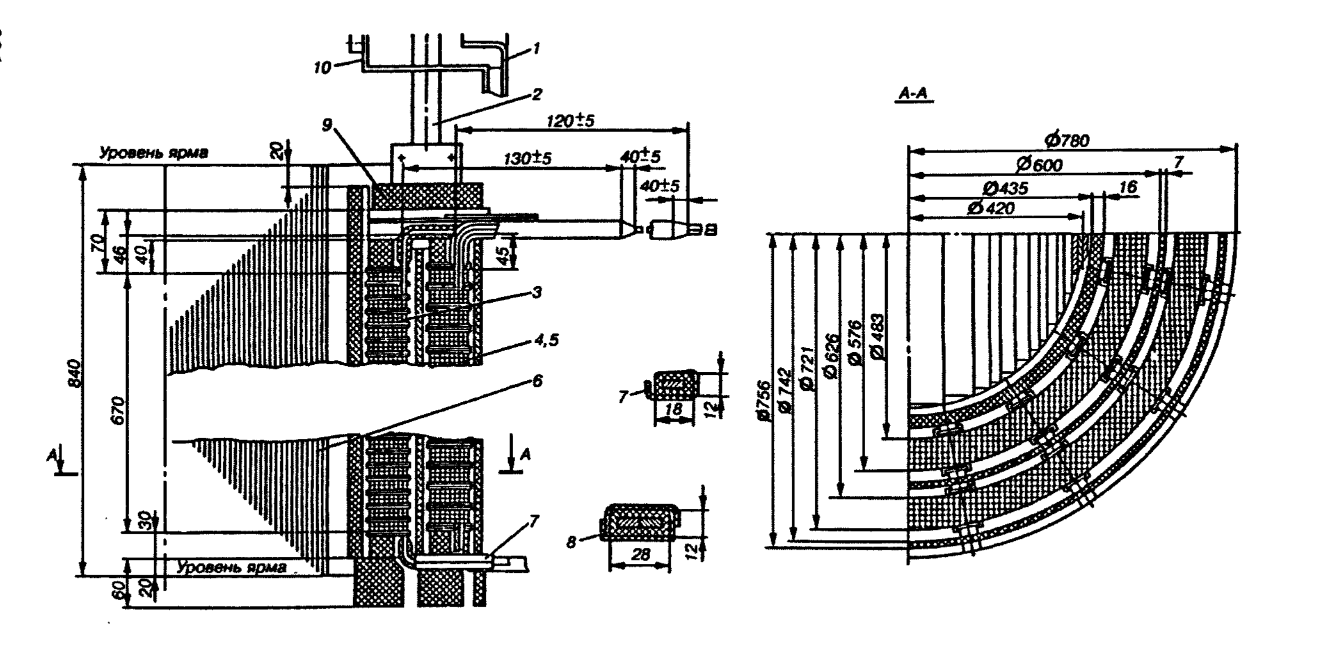


Рис. 18.8. Активная часть трансформатора ОНДЦЭ-10000/25-82:

1 — отводы; 2 — прижим; 3 — обмотка сетевая; 4 — блок обмоток стержни А; 5 — блок обмотки стержня А: 6 — остов трансформатора; 7, 8 — коробка; 9 — кольцо прессующее; 10 — верхняя ярмовая балка

18.5.3. Автоматическое прессующее устройство

При работе трансформатора изоляция катушек дает усадку, что может вызвать перемещение катушки от действия вибраций и динамических усилий, вызывающее повреждение изоляции и выход из строя трансформатора.

Тяговый трансформатор ОЦР-1000 /25 электропоездов ЭР9П, ЭР9Е содержит специальные прессующие шпильки, ввинченые в балку ярма. Один конец шпильки заканчивается цилиндрической пластиной, а другой — квадратом под гаечный ключ. Цилиндрическая пластина упирается в металлическое кольцо, надетое поверх обмоток. По мере усыхания изоляции обмоток шпильки при плановых ремонтах подтягивают, воздействуя через металлическое кольцо на обмотки трансформатора.

В тяговых трансформаторах грузовых электровозов установлены автоматические прессующие устройства обмотка (рис. 18.9). На ярмовой балке расположены два специальных винта *5*. Между винтом и башмаком имеется наклонный стержень *3*. Башмаки насажены на шпильку, которая одним концом упирается в винт, а другим — в башмак *4*. В то же время на башмак воздействует пружина *6*, с одного конца ограниченная упором *7*. По мере усадки изоляции обмоток под действием пружины *6* стержень будет стремиться принять вертикальное положение, воздействуя на башмак *4*, который будет скользить по металлическому кольцу *1* и, нажимая на него, прессовать обмотки трансформатора. Пружина *6* постоянно находится в сжатом положении. Сжатое состояние первоначально создают гайкой *2* с шайбой, показанной на рис. 18.9. После сжатия пружины *6* и установки стержня *3* в наклонном положении, стяжные гайки и шайбы удаляют.

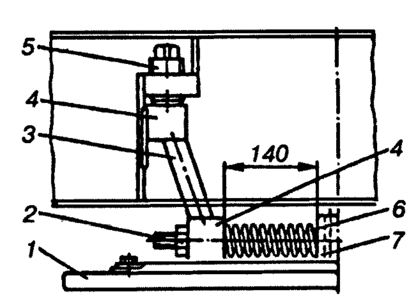


Рис. 18.9. Автоматическое прессующее устройство:

1 — прессующее кольцо; 2 — гайка; 3 — штанга; 4 — башмак; 5 — винт; 6 — пружина; 7 — упор

18.5.4. *Вводы*

На крышке бака устанавливают вводы трансформатора. Ввод обмотки на 25 кВ (рис. 18.10) состоит из фарфорового изолятора *5* и медного стержня *1*. Один конец фарфорового изолятора заходит внутрь бака, а другой выступает над крышкой *10*. Сечение токоведущего стержня определяется величиной тока, проходящего через вводы.

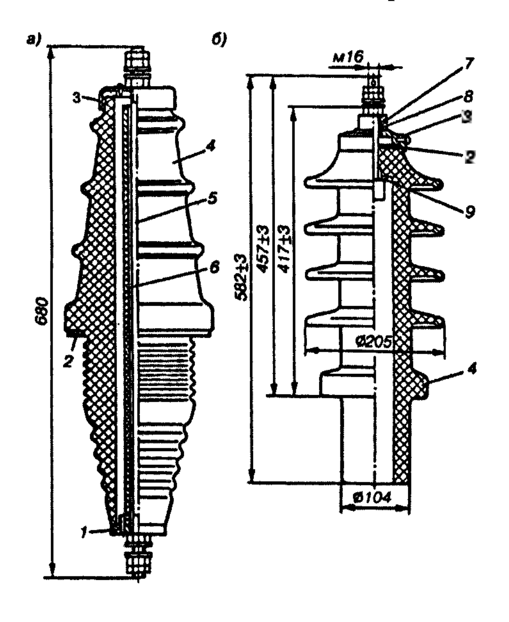


Рис. 18.10. Ввод сетевой обмотки 35 кВ несъемный (а) и съемный (б):

1 — шайба гетинаксовая; 2, 9 — прокладка резиновая; 3 — колпак стальной; 4 — изолятор фарфоровый; 5 — стержень медный; 6 — трубка бумажно-бакелитовая; 7 — втулка стальная; 8 — кольцо уплотнительное

Для тяговых обмоток применяют съемные вводы (рис. 18.11), благодаря которым можно заменить поврежденные фарфоровые изоляторы, не поднимая выемную часть.

Вводы обмоток собственных нужд устанавливают в одной латунной обойме и армируют магнезиальным цементом. Применяют и составные вводы, позволяющие производить замену вводов без поднятия выемной части трансформатора.

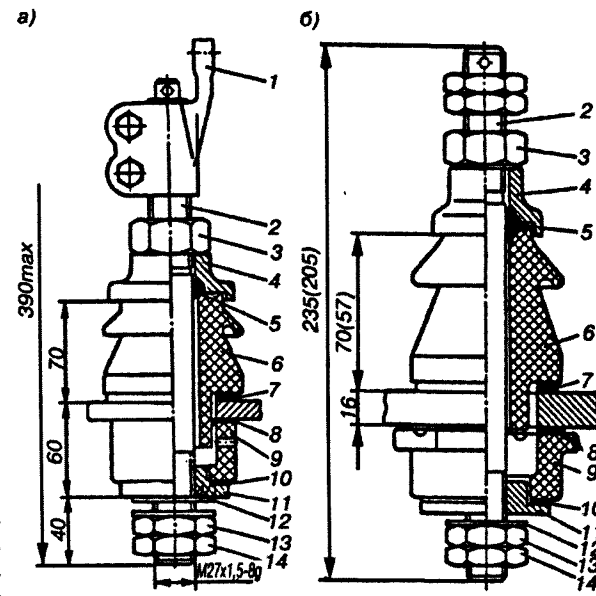


Рис. 18.11. Составной ввод на напряжение I кВ и токи 1000 А (а), 600 и 250 А (б):

1 — литой наконечник; 2 — токоведущий стержень; 3 — гайка; 4 — колпак; 5, 7, 8, 10 — резиновая прокладка; 6 — изолятор; 9 — фарфоровая втулка; 11 — втулка; 12 — шайба; 13, 14 — гайки

18.5.5. Бак тягового трансформатора

Бак трансформатора (рис. 18.12) сварной. Швы сварных соединений выполняют маслоплотными. Толщину стен выбирают от 4 до 10 мм, а толщину дна — от 8 до 12 мм. На крышке трансформатора устанавливают расширитель, сваренный из листовой стали и посредством трубы соединенный с баком. В верхней части бака установлен мотор-насос с трубопроводами, теплообменниками (радиаторами), воздуховодами.

Теплообменники собирают из двух корпусов и впаянных в них медных трубок, по которым протекает масло. Для создания большей поверхности охлаждения к трубам припаивают тонкие медные пластины.

К теплообменникам подведены воздуховоды от мотор-вентиляторов. Интенсивный поток воздуха, поступающий от

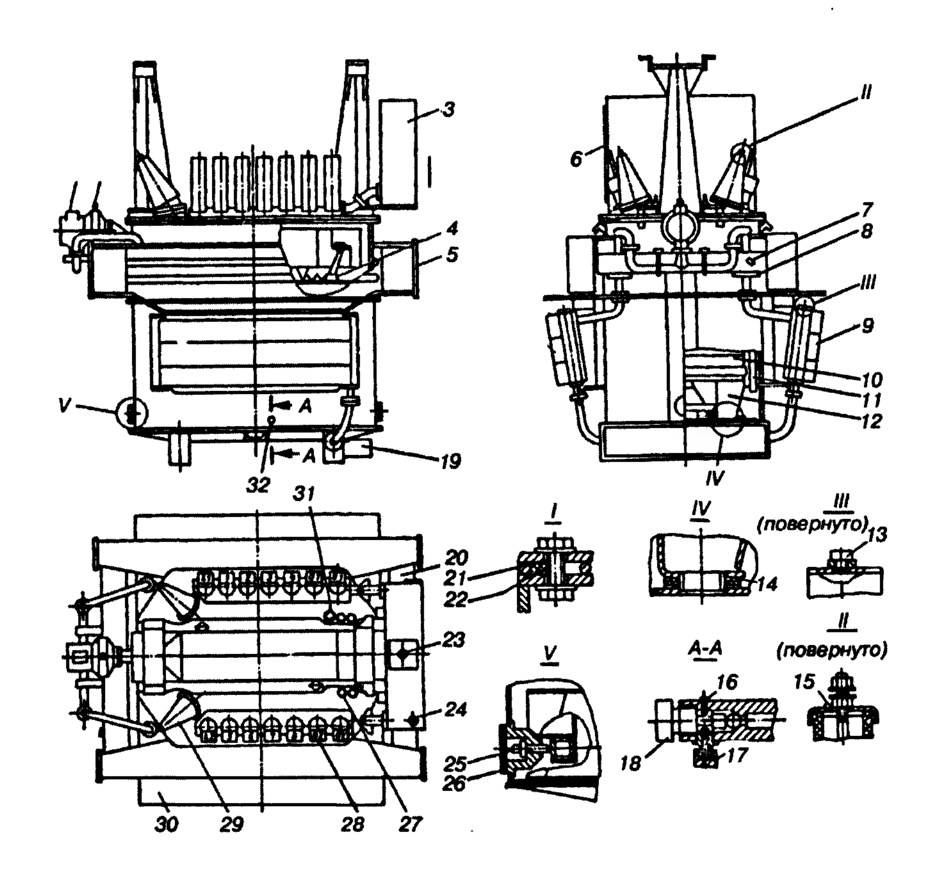


Рис. 18.12. Тяговый трансформатор ОДЦЭ-5000/25Б:

1 — электронасос; 2 — запорное устройство; 3 — расширитель; 4 — прижим; 5 —балка-камера; 6 — указатель уровня масла; 7 — бобышка заземления; 8 — опорный стакан; 9 — охладитель; 10 — активная часть: 11 — отводы; 12 — ярмовая балка; 13 — пробка для удаления воздуха; 14 — прокладка; 15 — винт для удаления воздуха; 16 — винт фиксируютщий; 17 — колпачок; 18 — болт; 19 — вентиль; 20 — балка опорная; 21 — пруток; 22 — прокладка; 23 — пробка для дыхания; 24 — пробка для доливки масла; 25 — шпилька упора; 26 — заглушка; 27 — ввод обмотки собственных нужд; 28 — ввод тяговой обмотки; 29 — ввод сетевой обмотки; 30 — фартук; 31 — карман для термобаллона термометра манометрический; 32 — кран для отбора пробы масла

мотор-вентилятора быстрее охлаждает масло в теплообменниках. На боковой поверхности расширителя имеется маслоуказатель с отметками минимального и максимального уровней масла. Масло занимает минимальный объем при выключенном трансформаторе и температуре воздуха –50^{0}С, максимальный объем — при наибольшем допустимом превышении температуры верхних слоев масла над температурой окружающего воздуха, равной 45°С.

Активная часть занимает в баке небольшой объем. Возникает вопрос: почему устанавливают расширитель? Ведь, казалось бы, можно не доливать масло в бак и оно будет изменяться в своем объеме в баке, не оголяя активной части. И стоимость трансформатора станет ниже (не надо изготовлять расширитель с подходящими к нему трубопроводами). Однако без расширителя увеличивается площадь соприкосновения масла с воздухом и следовательно, быстрее будет происходить его окисление, что потребует более частой замены масла. При полностью заполненном баке маслом, в расширителе площадь соприкосновения масла с воздухом мала, что предохраняет его от быстрого окисления и увлажнения.

Расширитель свободно сообщается с атмосферой через специальную пробку, имеющую отверстие для входа и выхода воздуха при температурном изменении объема содержащегося в нем масла. Попадающая в расширитель влага конденсируется и скапливается в отстойнике, находящимся в нижней части расширителя.

Для наполнения бака маслом, а также для слива масла из бака на его боковой стенке имеется кран, а также пробка для отбора пробы масла.

Для контроля температуры масла в расширителе устанавливают термосигнализатор типа ТС. Он имеет стрелку и шкалу, отградуированную в градусах Цельсия, и полую (манометрическую) пружину. Пружина соединена капиллярной трубкой с теплоприемником, помещенным в бак трансформатора. Пружина, капиллярная трубка и теплоприемник образуют замкнутую систему, заполненную жидкостью. При нагреве масла в трансформаторе объем жидкости в системе термосигнализатора увеличивается, что приводит к деформации полой пружины и перемещению стрелки прибора, соединенной с ней.

18.5.6. Воздухоосушитель

Воздухоосушитель предназначен для поглощения влаги из воздуха, и, следовательно, предотвращает попадание ее в трансформаторное масло.

Его устанавливают в тяговых трансформаторах электропоездов типа ОЦР-1000/25 и ОДЦЭР-1600/25, в которых отсутствуют расширители, а также в трансформаторах LTS-7,85/25 и SL68/3848/51 электровозов ЧС4 и ЧС4т. Из отечественных магистральных электровозов воздухоосушитель установлен в тяговом трансформаторе ОНДЦЭ-10000/24-82.

На рис. 18.13 показаны воздухоосушитель трансформатора LTS-7,85/25 и схема циркуляции масла в нем. С расширителем воздухоосушитель соединен трубкой *10* и гайкой *9*. Масляный затвор *1* предназначен для очистки воздуха от пыли и грязи. Масло в затвор заливается до винта *2*. С атмосферой расширитель сообщается через маслянный затвор *1*, наполнитель *4*, трубки *6* и *10*. В качестве наполнителя применяют силикагель, блаугель или их смесь. Блаугель в сухом состоянии имеет синий цвет, а при поглощении влаги становится розовым. Сухой силикагель — белого цвета; увлажняясь, он не изменяет цвет.

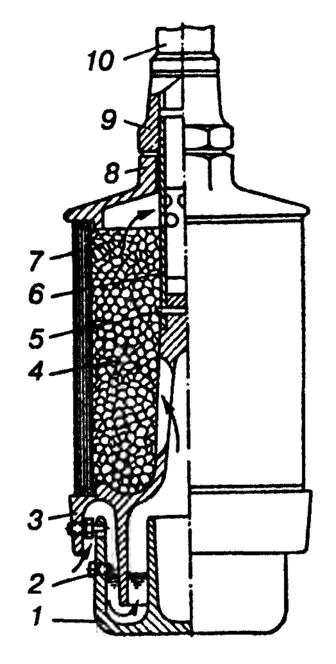


Рис. 18.13. Воздухоосушитель:

1 — масляный затвор; 2 — винт; 3 — корпус; 4 — наполнитель; 5 — шплинт; 6, 10 — трубка; 7 — стеклянный цилиндр; 8 — верхняя крышка; 9 — гайка

18.6. Тяговый трансформатор ОЦР-1000/25

Тяговый трансформатор ОЦР — 1000/25 электропоезда ЭР9М подвешивается под кузовом моторного вагона на двух балках. Он состоит из прямоугольного стального бака и выемной части, укрепленной на крышке. На баке смонтированы: система циркуляции масла, воздухоосушитель, коробка высоковольтного ввода, изоляторы выводов обмоток трансформатора, мотор-насос. К выемной части относятся магнитопровод (рис. 18.14) с обмотками *11*, соединительные шины *3* и крышка *1*. Тяговый трансформатор имеет стержневой сердечник с надетыми на него цилиндрическими обмотками. Сер

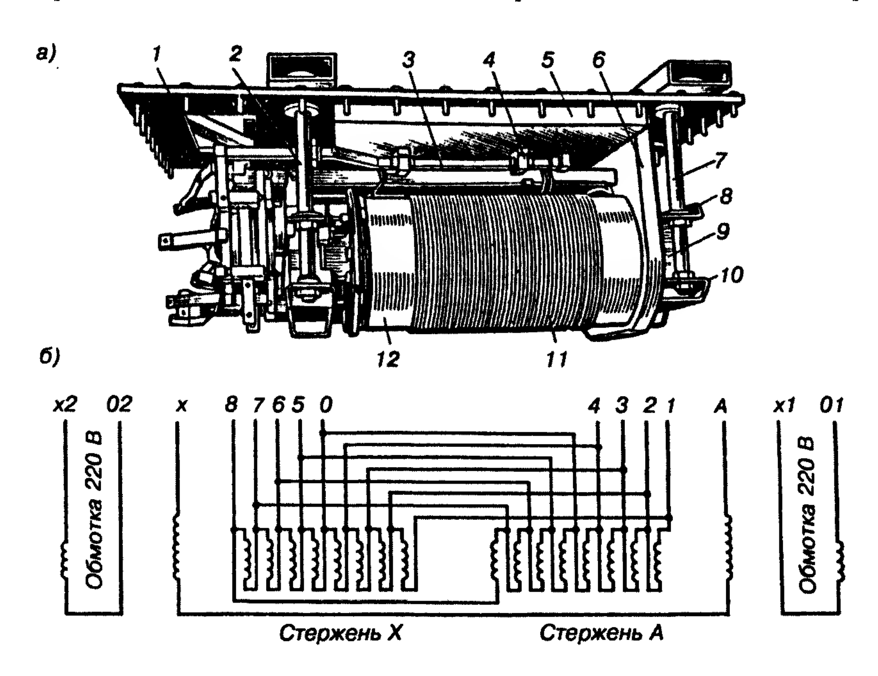


Рис. 18.14. Выемная часть(а), схема соединения обмоток(б) трансформатора ОЦР-1000/25:

1 — крышка; 2, 7 — шпилька; 3 — медные шины; 4 — деревянные планки; 5 — коробка; 6 — перегородки; 8, 10 — ярмовые балки; 11 — обмотки; 12 — цилиндр

дечник с обмотками расположен горизонтально и крепится с помощью специальных болтов к крышке *1* бака. Сечение стержней магнитопровода ступенчатое, многоугольное, приближающееся по форме к круглому; сечение ярма прямоугольное.

Листы стержней и каждого ярма стянуты между собой болтами, на которые надеты бакелитовые цилиндры *12*. Под головки болтов и гаек подложены бакелитовые шайбы. На стержнях концентрично расположены обмотки.

Трансформатор имеет четыре обмотки: первичную *AX* на номинальное напряжение 25 кВ, тяговую *1-8* для питания тяговых электродвигателей через выпрямительную установку; две обмотки собственных нужд — a_2x_2 для питания вспомогательных цепей и a_1x_1 для питания цепей электрического отопления. Каждая обмотка состоит из отдельных катушек, намотанных из медной шины. Катушки насажены на бакелитовые трубки, обладающие хорошими изоляционными свойствами, и включены в соответствии со схемой последовательно или параллельно.

Между витками катушек имеются специальные дистанционные планки для свободного доступа охлаждающего масла. На внутренних цилиндрах ближе к стержням находятся первичная высоковольтная обмотка, на средних цилиндрах — вторичная обмотка. Каждая вторичная обмотка разбита на восемь последовательно соединенных секций. В зависимости от количества включенных секций напряжение на тяговой обмотке изменяется от 276 до 2208 В. На наружных цилиндрах находятся вспомогательные обмотки: на стержне X — обмотка 220В собственных нужд, на стержне A — обмотка 600 В отопления салонов. Бакелитовые трубки на магнитопроводе укрепляют с помощью деревянных распорок.

18.6.2. Тяговый трансформатор ОДЦЭ-5000/25Б

Магнитопровод трансформатора (рис. 18.15) двухстержневой, шихтованный из пластин электротехнической стали марки 3414, толщиной 0,35 мм, без лакировки и отверстий. Стяжка стержней производится бандажами из стеклоленты. Ярма прес-

суются балками из гнутого профиля посредством болтов. Верхние и нижние ярмовые балки соединены вертикальными стяжными пластинами, имеющими зацепление с балками. Нижние ярмовые балки используются как камеры для направленной циркуляции масла.

Обмотки закреплены на трех изоляционных цилиндрах с помощью картонных прокладок и реек.

Ближе к сердечнику расположены нерегулируемые части тяговых обмоток (*a1-x1* на одном сердечнике и *a2-x2* на другом). В середине размещена сетевая обмотка. На наружном цилиндре расположены двойные дисковые катушки регулируемой части тяговой обмотки, а также обмотка собственных нужд.

На крышке бака, кроме расширителя, высоковольтных и низковольтных вводов установлены стойки для установки и крепления главного контроллера ЭКГ-8; между стойками, под главным контроллером, на крышке бака расположен переходной реактор.

В нижней части торцевых граней бака установлены две шпильки для крепления активной части. Отверстия в баке в местах установки

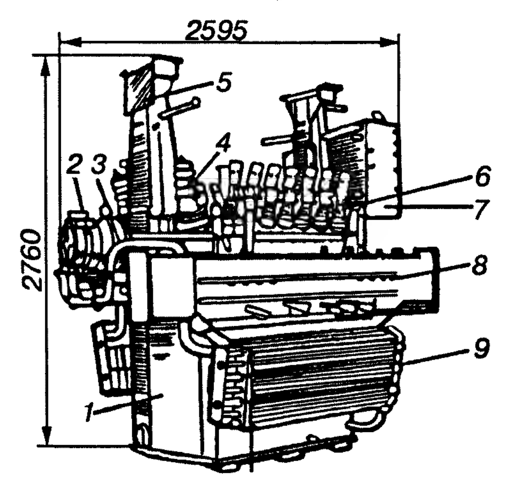


Рис. 18.15. Внешний вид трансформатора типа ОДЦЭ-5000/25Б:

1 — бак трансформатора: 2 — масляный электронасос; 3 — маслопровод; 4 — ввод сетевой обмотки; 5 —стойка для установки группового переключателя ступеней; 6 — ввод тяговой обмотки; 7 — бак расширителя; 8 — воздуховод; 9 — радиатор

упоров закрыты съемными стальными заглушками. Две балки — камеры приварены к стенкам бака. Они являются воздуховодами системы охлаждения и, кроме того, совместно с опорными используются как элементы конструкции рамной подвески бака, а также увеличивают жесткость продольных граней бака. В опорные балки вварены четыре стакана, являющиеся опрами трансформатора на электровозе. На опорной балке находится бобышка для заземления трансформатора. Уплотнение фартука с полом кузова выполнено с помощью резины.

В нижней части бака расположен вентиль для заливки и слива масла, а также кран для отбора пробы масла.

Трансформатор устанавлен в высоковольтной камере на резиновые амортизаторы между тележками электровоза и имеет некоторую свободу перемещения относительно кузова. Для достижения разных частот колебаний трансформатора и соединяемых деталей последние выполняют посредством гибких элементов: вводы соединены с шинным монтажом гибкими шунтами, а балки камеры соединены с воздуховодами — брезентовыми патрубками. Трансформаторы ОЦР-5600/25, ОДЦЭ-4000/25АМ, ОНДЦЭ-10000/25-82 показаны соответственно на рис. 18.16, рис. 18.17, рис. 18.18.

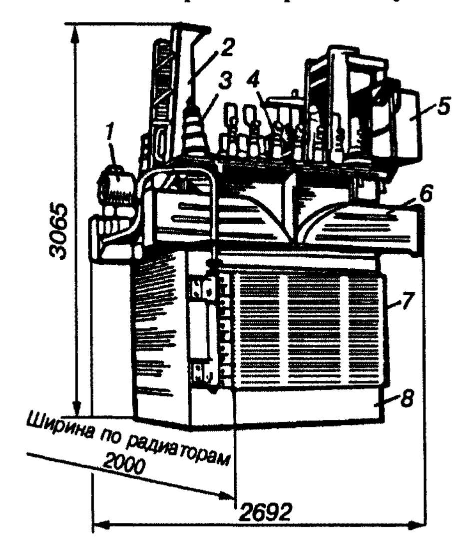


Рис. 18.16. Внешний внд трансформатора типа ОЦР-5600/25:

1 — маслянный электронасос; 2 — стойки для установки группового переключателя ступеней; 3 — вал сетевой обмотки; 4 — ввод тяговой обмотки

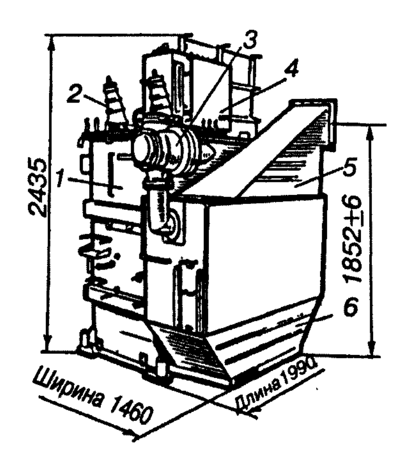


Рис. 18.17. Внешний внд трансформатора типа ОДЦЭ-4000/25АМ:

1 — бак трансформатора; 2 — ввод сетевой обмотки; 3 — масляный насос; 4 — бак расширителя; 5 — воздуховод; 6 — камера радиаторов

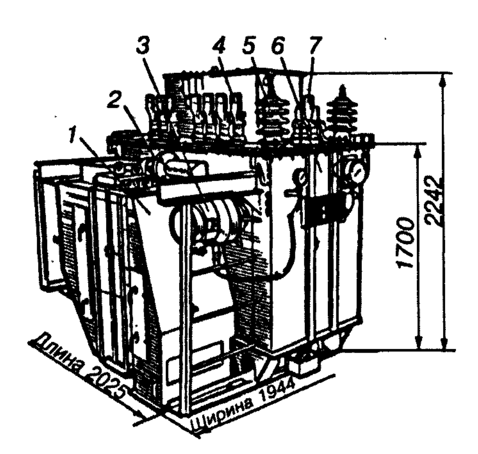


Рис. 18.17. Внешний внд трансформатора типа ОДЦЭ-4000/25АМ:

1 — бак трансформатора; 2 — ввод сетевой обмотки; 3 — масляный насос; 4 — бак расширителя; 5 — воздуховод; 6 — камера радиаторов

Контрольные вопросы

1. Каково назначение тяговых траисформаторов ?
2 Какие условия работы тяговых трансформаторов ?
3. Какие вы знаете разновидности тяговых трансформаторов ?
4. Что такое согласное и встречное соединение обмоток ?
5. Чем оличаются друг от друга магнитопроводы шпилечной и бесшпилечной конструкций ?
6 Какова конструкция автоматического прессующего устройства ?
7. Какова конструкция вводов тягового трансформатора ?
8. Почему иа некоторых тяговых трансформаторах применяют воздухоосушители ?

Глава 19.

Специальные трансформаторы, реакторы, индуктивные шунты, конденсаторы

19.1. Общие сведения

Реактором называют электрическую катушку, обладающую значительным индуктивным сопротивлением. Обычно индуктивное сопротивление реактора значительно превышает индуктивное сопротивление остальной электрической цепи.

Реакторы применяют: для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи тяговых двигателей пульсирующего тока (сглаживающие реакторы); для ограничения тока в секциях тягового трансформатора при переключении позиций главного контроллера (переходные реакторы); для защиты тяговых двигателей от нестационарных режимов (индуктивные шунты); для стабилизации напряжения (трансформаторы ТРПШ и др.); для сглаживания пульсаций выпрямленного тока в цепи аккумуляторных батарей в цепи защиты от замыкания на «землю», в качестве датчиков для ограничения тока к.з. в случае сквозного пробоя вентилей плеча выпрямителя (токоограничивающие реакторы), для поддержания равенства эффективной мощности дизеля и мощности нагрузки (индуктивный датчик), для регулирования тока возбуждения, возбудителя (амплистат), для формирования сигналов, пропорциональных току ТЭД или току генератора (трансформаторы постоянного тока), для подачи сигнала пропорционально напряжения тягового генератора (трансформаторы постоянного напряжения) и для других целей.

19.2. Сглаживающие реакторы

Сглаживающий реактор предназначен для уменьшения пульсации выпрямленного тока.

Форма выпрямленного тока показана на рис. 19.1. Уровень пульсации-

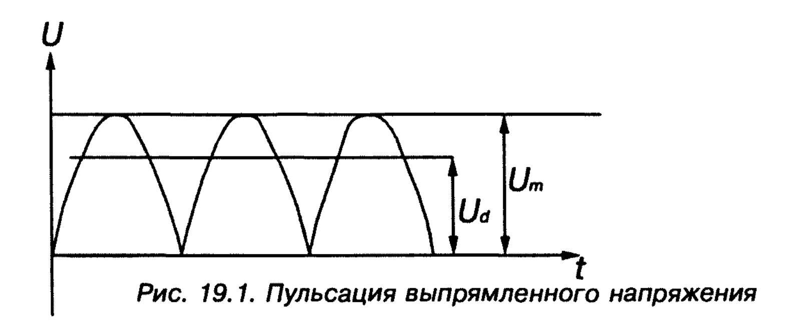


Рис. 19.1. Пульсация выпрямленного напряжения

выпрямленного напряжения оценивается коэффициентом пульсации

$$K_{пи} = U_m / U_d, \qquad (19.1)$$

где U_m — амплитудное значение переменной составляющей напряжения, В;

U_d — среднее значение выпрямленного напряжения, В.

Пульсации выпрямленного напряжения вызывают и пульсации тока ТЭД, которые тем больше, чем меньше индуктивность в цепи. Пульсация тока ухудшает коммутацию, увеличивает магнитные потери. Коэффициент пульсации тока

$$K_{пI} = I_m / I, \qquad (19.2)$$

где I_m — амплитудное значение тока, А;

I — среднее значение тока, А.

Коэффициент пульсации зависит от величины тока: чем больше ток, тем меньше пульсация и наоборот. Но, для условий нормальной работы ТЭД необходимо, чтобы величина пульсаций в любом режиме работы оставалась постоянной. Для этого в цепь тока включают реакторы, индуктивность которых наибольшая при малых токах и наименьшая при больших токах (рис. 19.2). Это объясняется тем, что в катушках с ферромагнитным сердечником индуктивность изменяется прямо пропорционально магнитной проницаемости. А магнитная проницаемость зависит от магнитной индукции. Если в обмотке

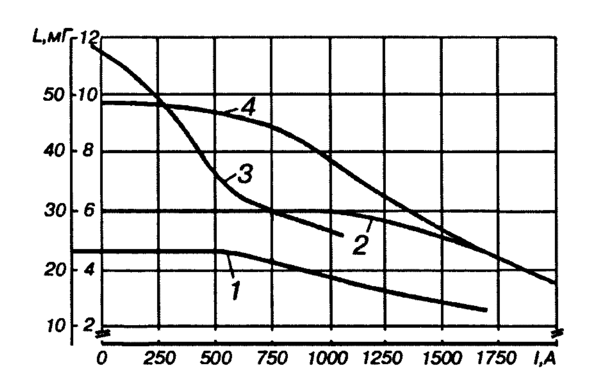


Рис. 19.2. Характеристики сглаживающих реакторов:
1 — РЭД4000А; 2 — РС-53; 3 — РС-56; 4 — РС-32

реактора ток возрастает, то одновременно возрастает и магнитная индукция, что вызывает уменьшение магнитной проницаемости, а следовательно, и уменьшение индуктивности. При уменьшении тока в обмотке реактора индуктивность последнего будет увеличиваться. Это свойство реактора с ферромагнитным сердечником используется в силовых цепях электровозов переменного тока для сглаживания пульсаций выпрямленного тока.

На электровозах ВЛ60^к устанавливают два сглаживающих реактора РЭД-4000А; ВЛ80^к — по четыре сглаживающих реактора РС-32; ВЛ80^т, ВЛ80^с, ВЛ80^р — также четыре сглаживающих реактора РС-53.

Основные технические данные сглаживающих реакторов приведены в приложении 5.

Основными частями сглаживающего реактора (рис. 19.3) являются катушка, магнитопровод или шихтованные экранирующие магнитные пакеты, монтажные детали.

Реактор РЭД-4000А (рис. 19.3, *б*) имеет стальной сердечник *1*, набранный из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм, на котором расположена катушка *4*. Стержни магнитопровода по высоте разделены немагнитными прокладками из гетинакса, уменьшающие насыщение сердечника при больших тока. Обмотка *4* выполнена в виде двенадцати спиральных дисковых катушек, которые намотаны из полосовой меди и соединены друг с другом последовательно. Обмотка

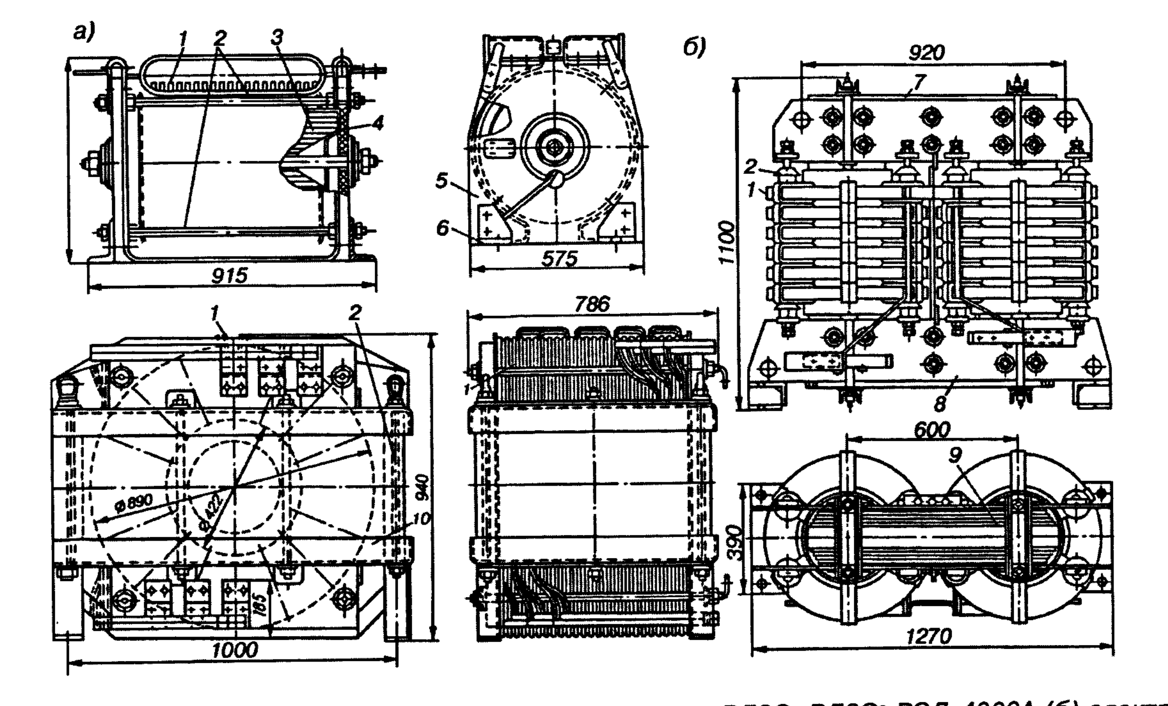


Рис. 19.3. Сглаживающие реакторы РС-53(а) электровозов ВЛ80^{т} ВЛ80^{с} РЭД-4000А (б) электровозов ВЛ60^{к}, ICLVH-7050, электровозов ЧС4, ЧС4^{т} (в):

1 — обмотка; 2 — шпильки стяжные; 3 — радиально-шихтованный сердечник; 4 — боковина гетинаксовая; 5 — кожух; 6 — установочный угольник; 7 — ярмовая балка; 8 — основание; 9 — разомкнутый магнитопровод; 10 — каркас

расположена на изоляторах *3*. Листы сердечника собраны в пакеты, стянутые шпильками *2*. Реактор РЭД-4000А расположен в воздухопроводе электровоза, благодаря чему обеспечивается принудительное охлаждение.

Сглаживающие реакторы РС-32 и РС-53 имеют начальную индуктивность 6 мГн (см. рис. 19.2), а при номинальном токе часового режима 1850А индуктивность уменьшается до 4 мГн.

Реактор РС-32 состоит из сердечника *3* и обмотки *2*. Сердечник набран из отдельных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. Обмотка состоит из 70 витков, намотанных на ребро из шинной меди.

Между витками обмотки укладывается изоляция из электронита, которая выступает над обмоткой. Обмотка и сердечник с боков зажаты гетинаксовыми боковинами *1* и в осевом направлении стянуты изолированными шпильками из немагнитного материала (дюралюминиевого сплава) (четырьмя по краям и одной по центру).

Отличие реактора РС-32 от РС-53 заключается в том, что на них применяют направляющие кожуха из стеклопласта для улучшения условий охлаждения.

Сглаживающие реакторы ЭРБД-800 и СР800 имеют магнитопроводы броневого типа. Реактор ЭРБД-800 имеет принудительное охлаждение, а реактор СР-800 охлаждается одновременно с установленными на нем охладителями масла тягового трансформатора.

Сглаживающий реактор 1LCVH-7050 содержит три обмотки, выполненные из алюминиевых шин с изоляцией из стеклополотна класса В.

19.3. Переходные реакторы

Переходные реакторы предназначены для ограничения в секциях тягового трансформатора электровоза при регулировании напряжения. Работа переходного реактора описана в гл. 18.

Переходной реактор (рис. 19.4) состоит из двух частей, каждая из которых работах самостоятельно.

Выполнен переходной реактор из четырех дисковых катушек *1*, намотанных в виде спирали из алюминиевой шины. Каждая

Таблица 10.1. **Основные техннческие данные переходиых реакторов**

Показатель	Переходной реактор типа		
	Пра-1	Мпра-3	Апра-48
Серия электровоза	ВЛ60[к]	ВЛ80[к]	ВЛ80[т], ВЛ80[с]
Номинальное напряжение между выводами, В	252	146	146
Ток ветви, А, в режиме:			
часовом	1100	1350	1350
продолжительном	1000	1270	1270
Индуктивное сопротивление, Ом	0,26	0,12	0,
12			
Число витков	44	32	27
Площадь сечения шины, мм^2	6,60	8,60	8,60
Масса реактора, кг	580	572	450

катушка в радиальном направлении скреплена восемью бандажами из стеклоленты в осевом направлении — шпильками *2* из дюралюминия. Концевые вводы алюминиевых шин подвергают специальном лужению с целью предохранения их от разрушения при работе в электрическом контакте с медью.

Переходные реакторы не имеют сердечников. Сверху и снизу реактора устанавливают экраны *4* и *5*, предназначенные для защиты металлических конструкций, расположенных вблизи реактора, от нагрева вихревыми токами.

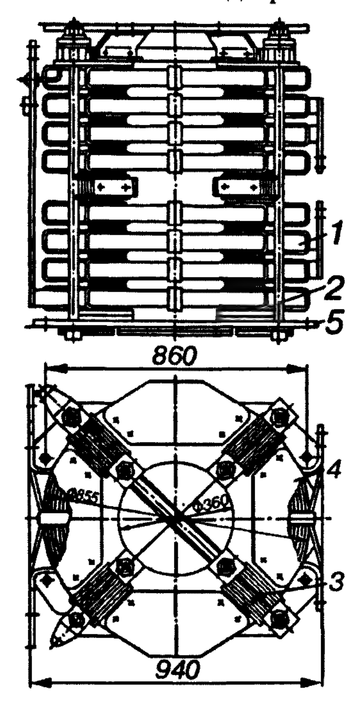


Рис. 19.4. Переходный реактор ПРА-48:

1 — катушка; 2 — шпилька; 3 — стальные пакеты; 4 — листы из асбоцементной доски; 5 — основание-лист из гетинакса

19.4. Индуктивные шунты

Индуктивные шунты предназначены для защиты тяговых двигателей электровозов от нестационарных режимов при ослаблении возбуждения.

На рис. 19.5 показана цепь ТЭД в режиме ослабления возбуждения с включенным в эту цепь индуктивными шунтом *ИШ*. Рассмотрим работу индуктивного шунта.

Предположим, что при движении электровоза или электропоезда произошел кратковременный отрыв токоприемника от контактного провода. В этом случае ток, протекающий по тяговым двигателям, уменьшится до нуля. Магнитный поток главных полюсов уменьшается до остаточного. Противо-ЭДС снизится до величины, определяемой остаточным магнетизмом ТЭД.

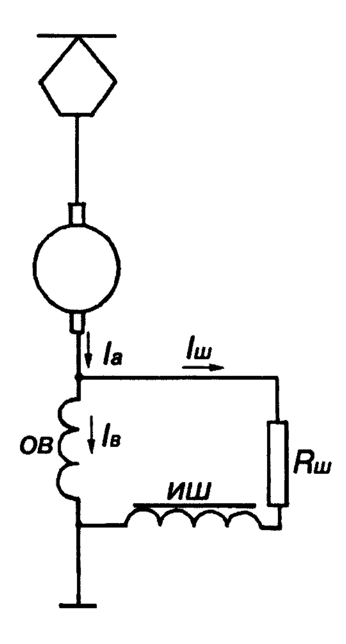


Рис. 19.5. Схема включения индуктивного шунта ИШ в цепи ТЭД

Когда токоприемник вновь коснется контактного провода то ток в виде волны с крутым фронтом потечет по ТЭД. Если, при этом осуществлялось движение в режиме ослабжения возбуждения, то ток будет разветвляться по двум параллельным ветвям: обмотке возбуждения и сопротивлению $R_ш$, шунтирующему цепь возбуждения (см. рис. 19.5). Так как обмотка возбуждения обладает значительной индуктивностью $L_в$, что равносильно разомкнутой цепи для тока с крутым фронтом волны, то весь ток потечет по шунтирующей цепи, минуя обмотку возбуждения. Это приведет к тому, что ток якоря не ограниченный противо-ЭДС, многократно превысит номинальное значение, что очень опасно для изоляции

обмоток, а также вызовет быстрое насыщение добавочных полюсов. Добавочные полюса будут недостаточно компенсировать реактивную ЭДС в коммутируемых секциях якоря, что приведет к сильному искрению под щетками и даже к круговому огню по коллектору.

Для защиты ТЭД от аварийного режима в шунтирующую цепь включают индуктивность $L_ш$, чтобы возникающая в ней ЭДС самоиндукции препятствовала значительному возрастанию тока и обеспечила такое распределение токов между обмоткой возбуждения и шунтирующей ее цепью, при котором коэффициент ослабления возбуждения соответствовал бы расчетному для данного типа двигателей. Обычно $L_ш > 0{,}61 L_в$.

Индуктивный шунт (рис. 19.6) состоит из обмотки и магнитопровода, набранного из листов электротехнической стали

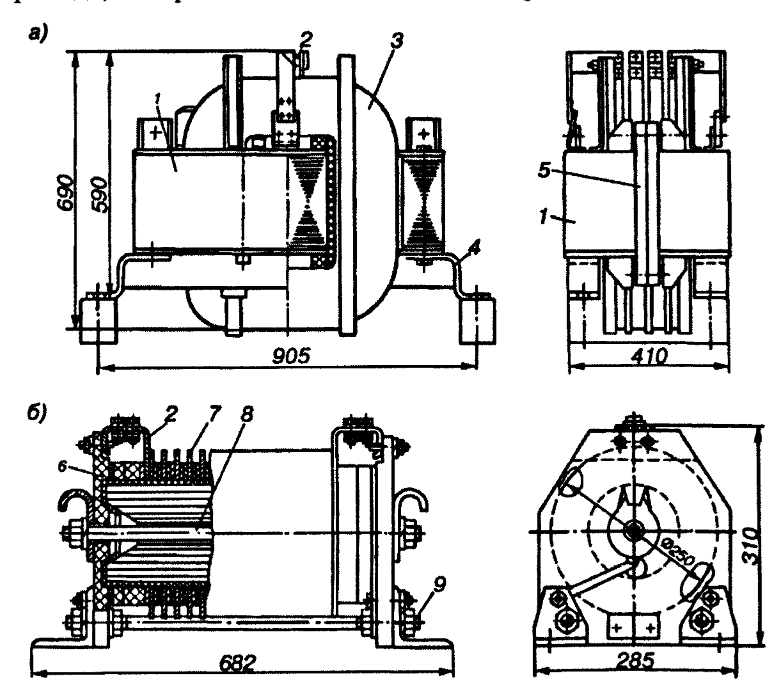


Рис. 19.6. Индуктивные шунты ИШ-2К (а) и ИШ-95 (б):

1 — магнитопровод; 2 — шины; 3 — катушки; *4 — каркас; 5* — прокладки; 6 — боковина из гетинакса; 7 — обмотка; *8, 9* — шпильки

толщиной 0,5–1,0 мм, изолированных друг от друга лаком.

Магнитные системы шунтов выполняют открытыми, стержневого типа с горизонтальными (шунты ИШ-2К), вертикальным расположением стержней, с воздушным зазором в стержнях (шунты CLVH-3254/41 электровозов ЧС2^т и др.), с одним горизонтальным радиально-шихтованным сердечником (шунты ИШ95 электровозов ВЛ80^т и ВЛ80^с и др.; конструкция которых подобна конструкции сглаживающих реакторов РС-53).

Обмотку катушек изготовляют из изолированной медной или алюминиевой полосы, намотанной на ребро с зазором между витками для лучшего охлаждения.

19.5. Индуктивные делители

При параллельном соединении тиристоров возникают трудности с распределением токов в параллельных ветвях (электровозы ВЛ80^р), особенно в момент включения тиристоров. При недостаточной точности подбора тиристоров по прямому падению напряжения *u*, после снятия управляющих импульсов тиристоры работают неустойчиво: в одних параллельных ветвях токи нарастают, в других спадают до нуля.

Для выравнивания токов в параллельных ветвях применяют индуктивные делители, включенные в цепь переменного тока. Их соединяют по схеме, изображенной на рис. 19.7.

Предположим, что возрастет ток, например, в обмотке делителя *L*15, а это вызовет увеличение магнитного потока в замкнутом магнитопроводе делителя, что приведет к увеличению величины индуктированной ЭДС в обмотках, которые соединены встречно. Увеличение ЭДС — это увеличение разности потенциалов между анодом и катодом тиристора второй ветви и его открытие, что приведет к равномерному распределению тока между параллельно включенными тиристорами.

Магнитопроводы индуктивных делителей делают ненасыщенными, что обеспечивает одинаковую нагрузку плечами преобразователя в любой момент открытия тиристоров.

Индуктивность делителей зависит от параметров преобразователей. Соотношение между числом витков и воздушным

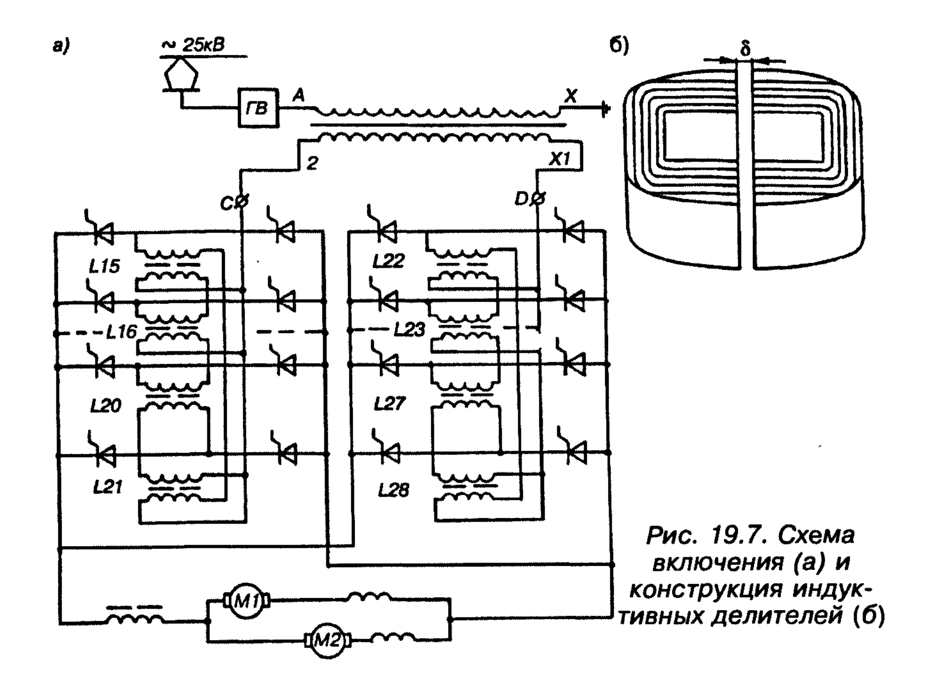


Рис. 19.7. Схема включения (а) и конструкция индуктивных делителей (б)

зазором (рис. 19.7, *б*) выбирают таким, чтобы делитель не насыщался во всем диапазоне нагрузок.

19.6. Индуктивный датчик

Индуктивный датчик (ИД) типов ИД-10, ИД-32 применяется на тепловозах типов 2ТЭ10Л, 2ТЭ10М и ИД20, ИД32 на тепловозах типа 2ТЭ116 и предназначен для поддержания равенства эффективной мощности дизеля и нагрузки. ИД преобразует механическое перемещение якоря в катушке в электрический сигнал. ИД состоит из корпуса *1* (рис. 19.8), с катушкой *2*, внутри которой расположен якорь *5*. Якорь соединен со штоком серводвигателя объединенного регулятора дизеля. Катушка *2* получает питание от распределительного трансформатора. Если перемещать якорь внутри катушки, то индуктивность катушки будет изменяться Это приводит к изменению ее индуктивного сопротив-

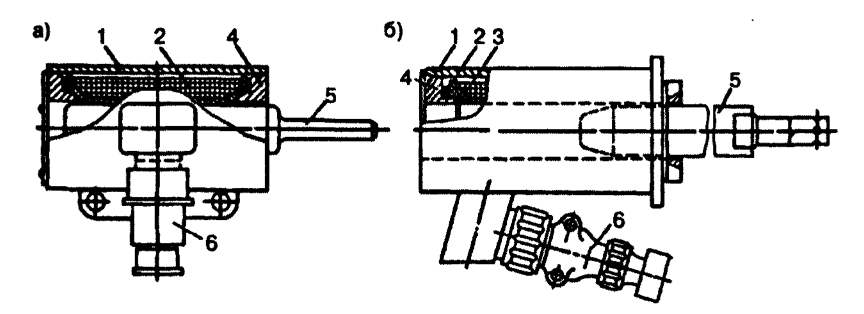


Рис. 19.8. Индуктивные датчики:

а — ИД-20; б — ИД-32; 1 —корпус; 2 — катушка; 3 — изоляционный каркас; 4 — фланец; 5— якорь; 6 — штепсельный разъем

ления, а следовательно и величины тока. Наибольший ток будет при минимальной индуктивности катушки, т.е. при выдвинутом якоре. Катушка через распределительный трансформатор подключена к регулировочной обмотке амплистата (см. рис. 19.10). Датчики ИД-31 и ИД-32 отличаются от датчиков ИД-10 и ИД-20 конструкцией крепления к регулятору дизеля. Параметры датчиком ИД-31 и ИД-32 приведенными ниже:

Таблица 19.2

Параметры	ИД-31	ИД-32
Напряжение, В	10	17
Ток продолжительный, А	1,5	0,26
Ход якоря, м	65	65
Сопротивление катушки, Ом:		
полное минимальное, не менее	5,5	65
полное максимальное, не более	70	550

19.7. Распределительный трансформатор

Распределительный трансформатор (ТР) применяют на тепловозах. Он служит для питания цепей переменного тока: амплистата возбуждения; трансформаторов постоянного тока и постоянного напряжения; индуктивного датчика.

ТР имеет тороидальный сердечник из электротехнической холоднокатанной стали. Сердечник, обмотки и клеммная плата залиты эпоксидным компаундом.

Основные данные трансформатора при частоте 133 Гц даны в табл. 19.3.

Таблица 19.3.

Параметр	Маркировка выводов						
	1–4	1–3	5–6	7–8	9–10	11–12	2–3
Напряжение, В	100	60	31,5	60	6-0	60	10
Продолжительный ток, А	—	11	2,5	2,6	2,6	2,6	1,4

19.8. Трансформатор стабилизирующий

Трансформатор стабилизирующий (СТР) применяют на тепловозах с амплистатом. Он предназначен для устранения незатухающих колебаний узла возбуждения при резких изменениях нагрузки.

Первичная обмотка подключается к возбудителю и выполнена проводом ПЭТВ-С диаметром 1 мм и содержит 1900 витков. Вторичная обмотка выполнена из того же провода и содержит 1000 витков; подключена к стабилизирующей обмотке амплистата.

Трансформатор СТР работает только во время переходных процессов.

19.9. Импульсные трансформаторы

Импульсные трансформаторы (ИТ) предназначены для передачи импульсных сигналов малой длительности и применяются в устройствах автоматики ТПС.

Мощность импульсов, передаваемая ИТ, достигает нескольких ватт, их длительность колеблется от долей микросекунды до нескольких сотен микросекунд. В каждом отдельном случае параметры ИТ подбирают опытным путем.

При изготовлении магнитопровода применяют материалы с улучшенными магнитными свойствами при высоких частотах:

специальную высоколегированную электротехническую сталь, железоникелевые сплавы типа пермаллой и др. Для этой цели используют тороидальные сердечники, имеющие весьма малое магнитное сопротивление. Сердечники выполнены из пермаллоя для снятия внутренних напряжений, которые ухудшают магнитные свойства. Сердечники отжигают в водороде, а также помещают в специальные контейнеры, защищающие их от внешних воздействий.

19.10. Магнитный усилитель без обратной связи

Магнитный усилитель представляют собой электромагнитный аппарат, имеющий ферромагнитный сердечник с обмотками и предназначенный для управления выходным сигналом большой мощности посредством одного или нескольких входных сигналов малой мощности.

Магнитный усилитель без обратной связи состоит из сердечника, выполненного из ферромагнитных материалов (железокремниевых или никелевых сплавов) и обмоток переменного и постоянного тока (рис. 19.9). Обмотки переменного тока называют рабочими обмотками (ОР), обмотки постоянного тока — обмотками управления или подмагничивания (ОУ).

На обмотку управления подают постоянный ток $I_у$ (входной сигнал), а на зажимы рабочей обмотки включают нагрузку $R_н$. Рабочая обмотка получает питание от источника переменного тока.

Если иа обмотку управления подать постоянный ток $I_у$, то изменится насыщение сердечника, вследствии чего изменится его магнитная проницаемость и индуктивное сопротивление X_L. Изменение индуктивного сопротивления вызовет изменение тока в рабочей обмотке и падение напряжения на нагрузке $R_н$.

Обычно магнитные усилители состоят из двух одинаковых сердечников, чаще всего тороидальной формы, на каждом из которых размещены одинаковые рабочие обмотки. Для устранения наводки ЭДС взаимоиндукции в обмотках управления от переменного магнитного потока обе части рабочей обмотки соединяют встречно и последовательно. В этом случае магнит

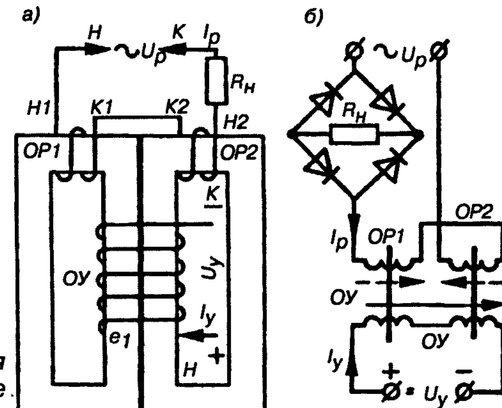


Рис. 19.9. Простой магнитный усилитель:

а — схема расположения обмоток; б — соединение обмоток усилителя

ный поток и индуктированная ЭДС будут в противофазе. Это позволяет применить общую обмотку управления, охватывающую оба сердечника.

Коэффициент усиления по мощности равный отношению выходной мощности $P_{вых}$ к входной мощности $P_{вх}$

$$K = P_{вых}/P_{вх}.$$

Коэффициент усиления магнитных усилителей составляет от нескольких десятков до нескольких сотен единиц.

В ТПС магнитные усилители с самоподмагничиванием применяют: в блоках автоматики; в зарядных агрегатах; в цепях питания обмоток возбуждения.

19.11. Трансформаторы постоянного тока

Трансформаторы постоянного тока (ТПТ) на электровозах используют для получения тока в измерительной цепи, пропорциональному току силовой цепи, и для изолирования измерительной цепи от силовой.

На тепловозах ТПТ предназначены для формирования сигналов, пропорциональных току тяговых двигателей или току тяговых генераторов, использующихся в обмотке управления амплистатом.

На рис. 19.10 представлена принципиальная схема трансформаторов постоянного тока электровоза ВЛ80^{т}.

Латунный стержень пропущен через два тороидальных сердечника *A1* и *A2*. Этот стержень является первичной обмоткой ТПТ. Вторичные обмотки тороидов включены встречно по отношению друг к другу и получают питание от неизменного по величины напряжения трансформатора $T_р$ через резистор *R*. Величина тока i_m в этой цепи зависит от сопротивления *R* и индуктивного сопротивления обмоток тороидов. Предположим, что силовой ток *I*, увеличивается. В этом случае произойдет намагничивание и насыщение тороидальных сердечников, что приведет к уменьшению индуктивного сопротивления, вследствии чего i_m увеличится. Для получения в измеряемой цепи постоянного тока, к резистору *R* подсоединяют выпрямительный мост, на выходе которого получаем выпрямленный ток I_2, также пропорциональный измеряемому току I_1.

При уменьшеии силового тока произойдет увеличение индуктивного сопротивления вторичных обмоток тороидов, вследствии чего уменьшатся токи i_m и I_2.

Аналогично устроен и работает ТПТ тепловозов.

19.12. Трансформатор постоянного напряжения

ТПН типа ТПН-3А применяется в тепловозах и служит для подачи сигнала, пропорционального напряжению тягового генератора. Сигнал от ТПН поступает в обмотку управления амплистата. Намотки рабочих обмоток и конструкция сердечников такие же, как у ТПН. Управляющая обмотка охватывает оба сердечника.

19.13. Магнитный усилитель с обратной связью

Для получения более высокого коэффициент усиления, применяют МУ с обратной связью. Его соединяют по схеме, изображенной на рис. 19.11. Диоды *VD1–VD4* образуют выпрямитльный мост, в диагональ которого включена нагрузка R_H. Рабочие обмот-

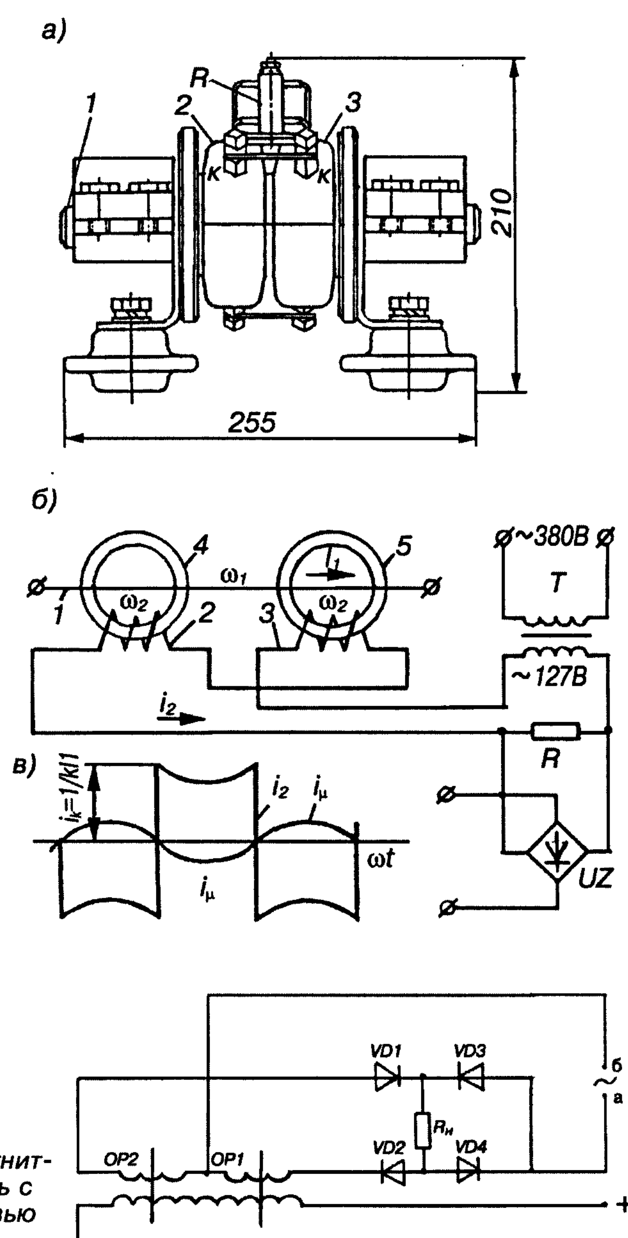


Рис. 19.10. Трансформатор постоянного тока(а), схема соединения его обмоток (б), кривые $i_2(\omega t)$ и $i_\mu(\omega t)$ (в)

Рис. 19.11. Магнитный усилитель с обратной связью

ки *OP1* и *OP2* включены последовательно с диодами внутри моста.

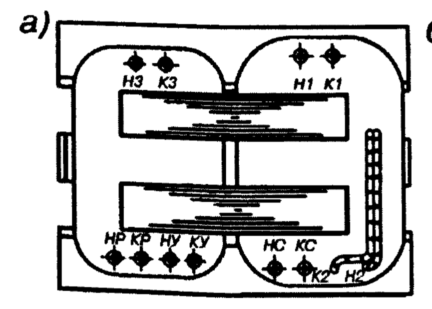
Предположим, что точка *а* имеет в первый полупериод положительный потенциал по отношению к точке *б*. В этом случае ток потечет по диоду VD3, резистору нагрузки $R_н$, диоду VD2, обмотке *OP1* к точке *б*. Во второй полупериод ток потечет от точки *б* по обмотке *OP2*, диоду *VD1*, $R_н$, *VD4* к точке а. Таким образом по обмоткам *OP1* и *OP2* протекают не переменный, а пульсирующий ток, который имеет две составляющие: постоянную и переменную. Постоянная составляющая тока, протекая по рабочим обмоткам подмагничивает усилитель. Следовательно, для подмагничивания забирается большая часть мощности переменного тока, что значительно увеличивает коэффициент усиления. Такой магнитный усилитель с внутренней обратной связью называют усилителем с обратной связью или амплистатом.

19.14. Амплистат

Амплистат АВ-3А имеет следующую техническую характеристику:

Напряжение питания, В	60
Напряжение выхода, В	35
Ток продолжительного режима, А	8,5
Сопротивление нагрузки, Ом	6

Амплистат (рис. 19.12) состоит из двух магнитопроводов, на которых расположено по одной рабочей обмотке (обмотки переменного тока). Обмотки подмагничивания (управления,



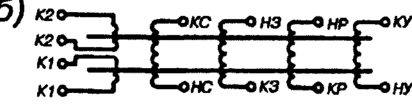


Рис.19.12. Амплистат АВ-3А:

а — общий вид; б — схема; Н1-К1, Н2-К2 — начало и конец рабочих обмоток, НС-КС — стабилизирующая обмотка; НЗ-КЗ — задающая; НР-КР — регулировочная; НУ-КУ — управления

задающая, регулировочная, стабилизирующая) охватывают оба магнитопровода. Катушки выполнены без каркаса и залиты эпоксидным компаундом.

19.15. Схема регулирования возбуждения амплистатом

На тепловозах (2М62, 2ТЭ10Л и др.), амплистаты применяют для регулирования тока возбуждения возбудителя, обеспечивая получение внешней характеристики тягового генератора близкой к гиперболе.

На рис. 19.13 показана схема регулирования напряжения тягового генератора с магнитным усилителем (амплистатом). На схеме указаны направления МДС: регулировочной обмотки *ОР*, обмотки управления *ОУ* и задающей *ОЗ*. Стабилизирующая обмотка создает МДС только при переходных процессах, например, при

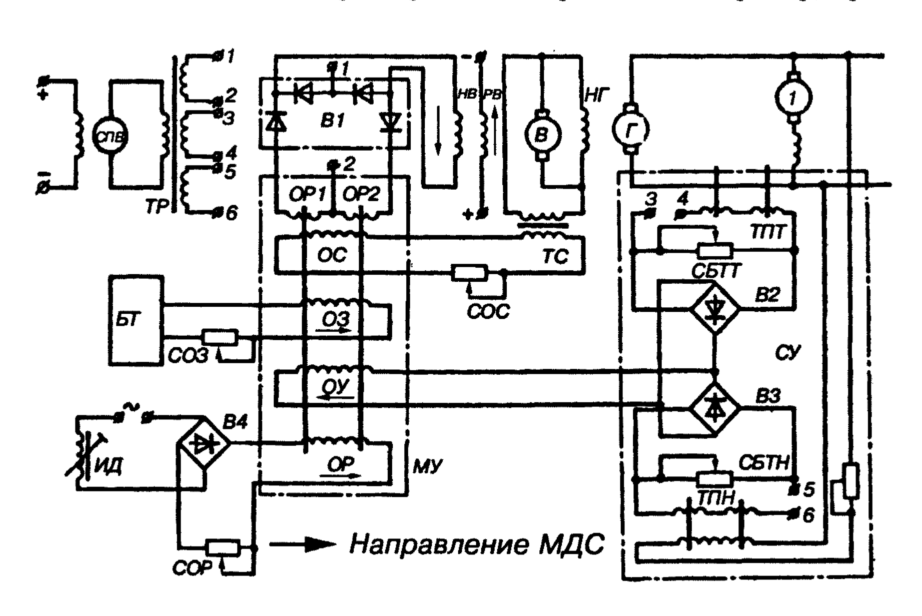


Рис. 19.13 Схема регулирования напряжения тягового генератора с магнитным усилителем

резком нарастании или уменьшении нагрузки, изменении напряжения, при переводе контроллера на другую позицию, что неблагоприятно сказывается на работе тягового генератора. В этом случае результирующая МДС магнитного усилителя изменяется так, чтобы зазмедлить скорость изменения тока на выходе МУ.

МДС всех обмоток управления алгебраически суммируются и результирующая МДС воздействует на рабочие обмотки *ОР1* и *ОР2*, изменяя тем самым ток, протекающий по обмотке возбуждения НВ возбудителя. Возбудитель, в свою очередь, изменяет ток, протекающий по независимой обмотке возбуждения *НГ* тягового генератора *Г* тепловоза, обеспечивая получение близкой к гиперболе внешней характерстики.

Статическая характеристика амплистата (рис. 19.14) условно разделена на зоны: *1* — зона разгона поезда (ограничение по току); *2* — зона работы с постоянной мощностью; *3* — зона максимальных скоростей (ограничение на напряжению). В случае, когда отсутствует ток в обмотках управления по рабочим обмоткам, из-за обратной связи протекает значительный ток (точка *Д*). При протекании тока подмагничивания положительного направления ток нагрузки возрастает до максимума. При отрицательном токе подмагничивания ток нагрузки снижается до минимального значения.

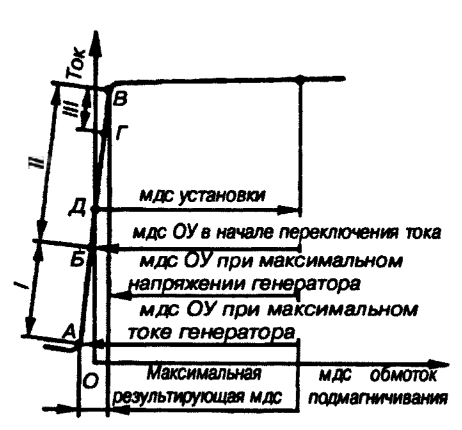


Рис. 19.14. Статическая характеристика магнитного усилителя:

I — зона разгона поезда (ограничение по току); II —работа с постоянной мощностью; III —зона максимальных скоростей (ограничение по напряжению)

Рассмотрим более подробно работу каждой из обмоток управления.

Селективный узел СУ (рис. 19.15) состоит из двух трансформаторов ТПТ и ТПН, двух балластных резисторов СБТТ и СБТН, двух мостовых выпрямителей *В3* и *В2*. СУ позволяет

суммировать токи ТПТ и ТПН при поддержании постоянной мощности тягового генератора.

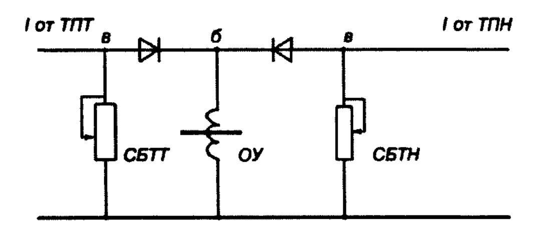


Рис. 19.15 Схема селективного узла

В момент трогания тепловоза с места (точка *А*, см. рис. 19.14) ток генератора больше, чем I_r max, т.е. выходной ток ТПТ имеет наибольшее значение, а ток на выходе ТПН близок к нулю. В селективном узле (см. рис. 19.15) ток разветвляется на две параллельные ветви.

Часть тока потечет по резистору СБТТ, остальная часть — в управляющую обмотку ОУ, где создается падение напряжения. Малый по значению ток ТПН протекающий по резистору СБТН, также создает на нем падение напряжения. Но, так как ток небольшой, то будет и небольшое падение напряжения, которое во много раз меньше того, которое создано по обмотке током от ТПТ. Вследствие этого потенциал точки б будет выше потенциала точки а и ток будет преимущественно в ОУ от ТПТ.

По мере увеличения скорости движения тепловоза ТПТ вместе с амплистатом поддерживает постоянный пусковой ток, а токи на выходе ТПТ, в резисторе СБТТ и в управляющей обмотке почти не меняются. Напряжение по характеристике при незначительном уменьшении тока резко возрастает, поэтому увеличивается ток на выходе ТПН и в резисторе СБТН, а следовательно возрастает падение напряжения на нем и потенциал точки *в*. В этом случае ток начинает протекать от точки *в* к точке *б*, т.е. выход ТПН «подключается» к управляющей обмотке амплистата.

Рассмотрим процесс перехода от ограничения пускового тока к ограничению мощности и далее к ограничению максимального напряжения.

Из статической характеристики амплистата (см. рис. 19.14) видно, что ток уставки (точка *Д*) значителен. Но, некоторые обмотки управления действуют размагничивающе, уменьшая ток нагрузки амплистата, другие обмотки, наоборот, усиливая, т.е. увеличивая ток нагрузки. При протекании тока по обмотке управления (помагничивающего), ток нагрузки возрастает до мак-

симума (точка *В*). При токе размагничивающем, ток нагрузки уменьшается до малого значения (точка *А*). А ток нагрузки протекает не только по обмоткам управления, но и по независимой обмотке возбуждения, создавая МДС. На рис. 19.14 указаны соответствующие значения МДС. При регулировании тока, мощности и напряжения рабочая точка перемещается вдоль характеристики амплистата от *А* до *В*. В момент трогания (точка *А*) ток генератора большой, и ток ТПТ превышает ток ТПН. При приближении к точке *Б*, к управляющей обмотке "подключается» ТПН. В точке *Б* заканчивается ограничение тока генератора. С ростом напряжения генератора его ток уменьшается в той мере, в какой увеличивается напряжение. За счет этого на участке *БВ* получается прямолинейная наклонная внешняя характеристика генератора и его мощность в диапазоне БВ поддерживается примерно постоянной.

В точке *Г* доля тока от ТПТ становится равной нулю. В управляющей обмотке ОУ с этого момента протекает ток от ТПН. В точке *В* весь ток ТПТ проходит по резистору СБТТ.

При увеличении скорости по характеристике (рис. 19.16), ток уменьшается, следовательно уменьшается ток на выходе ТПТ и падение напряжения на резисторе СБТТ. Тогда потенциал точки *б* превысит потенциал точки *а* (см. рис. 19.15) и ток от ТПТ не потечет на *ОУ*.

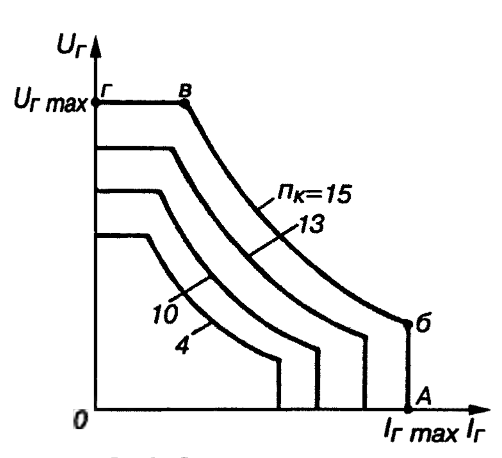


Рис. 19.16. Зависимость напряжения тягового генератора $U_г$ от тока $I_г$ при различных позициях контроллера $n_к$.

Но, на участке *БВ* внешней характеристики (см. рис. 19.16) не выполняется основное требование — полное использование мощности, так как характеристика прямолинейна, а не гиперболична. Для предотвращения перегрузки дизеля, на амплистате установлена регулировочная обмотка *ОР*, включенная последовательно с дат-

чиком ИД объединенного регулятора дизеля. Если мощность дизеля больше заданной, при данной частоте вращения, ток в *обмотке ОР* уменьшается. Если мощность дизеля меньше заданной, то ток *ОР* увеличивается. В этом случае возрастает напряжение на выходе *МУ*, а также напряжение и мощность тягового генератора.

К недостаткам рассмотренной системы регулирования напряжения генератора следует отнести сложность и использование машин постоянного тока.

19.16. Трансформатор РТПШ

Трансформатор регулирования подмагничиванием шунтов (ТРПШ) предназначены для питания через выпрямительный мост током цепи управления электровозом, подзарядки аккумуляторных батарей и стабилизации напряжения.

Как известно, напряжение в контактной сети может изменяться в довольно широких пределах. Если применить обычный трансформатор для питания через выпрямитель цепи управления и подзарядки аккумуляторных батарей, то надежной работы электровоза достичь было бы невозможно. При понижении напряжения аппараты цепей управления самопроизвольно отключались бы, а при повышении — выходили бы из строя. Срок службы аккумуляторной батареи сократился бы с 8–10 лет до нескольких недель.

Функцию стабилизации вторичного напряжения выполняет трансформатор ТРПШ (рис. 19.17). Он состоит из трех магнитопроводов: основного *2* и двух крайних (магнитные шунты) *1* и *3*. Все они набраны из листов электротехнической стали марки 3413 толщиной 0,35 мм. Два крайних магнитопровода имеют размеры в поперечном сечении 3,9x9,5 см, средний (основной) — 9,5x9,5 см. Магнитопроводы отделены друг от друга стальными трубками *4* и стянуты изолированными шпильками.

Первичная обмотка *6* состоит из двух катушек, соединенных последовательно. Обе катушки охватывают все три стержня магнитопровода. Вторичная обмотка *7* состоит из двух параллельно включенных катушек, намотанных только на средний *2* магни-

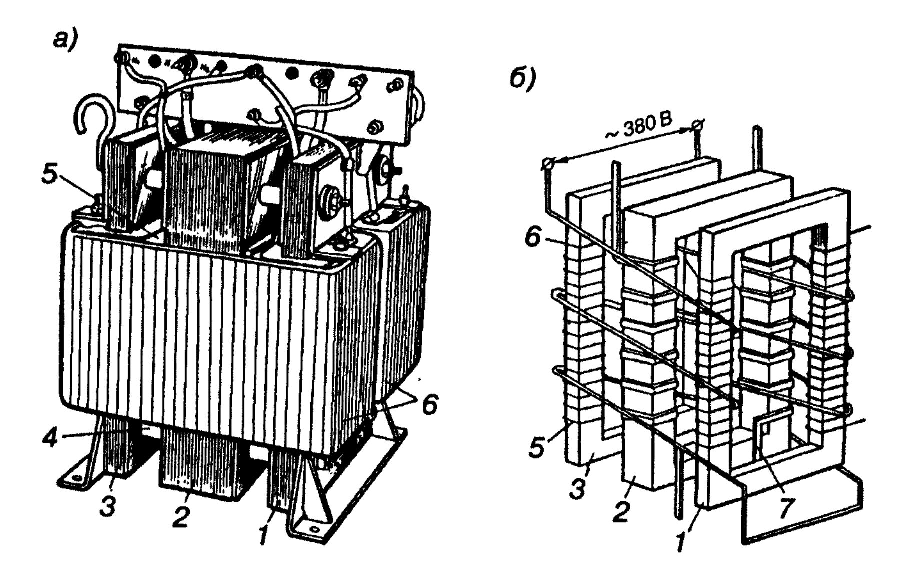


Рис. 19.17. Трансформатор ТРПШ-2 (а) и схема его обмоток (б):
1, 3 — шунты; 2 — средний (основной) магнитопровод; 4 — стальная трубка; 5 — обмотка управления; 6 — первичная обмотка; 7 — вторичная обмотка

топровод. На магнитных шунтах *1* и *3* (крайних стержнях магнитопровода) намотана обмотка управления *5*, состоящая из четырех катушек. Они соединены последовательно. Первичная обмотка *6* подключена на напряжение 380 В. Обмотка управления подключена к бесконтактному регулятору напряжения (БРН) — источнику постоянного тока. При снижении напряжения в контактной сети уменьшается напряжение в обмотке *6*, а в обмотке управления под действием БРН увеличивается постоянный ток. Это ведет к увеличению насыщения магнитных шунтов *1* и *3* постоянным магнитным потоком и вытеснению в основной магнитопровод *2* переменного магнитного потока, увеличивающего напряжение во вторичной обмотке *7*.

С увеличением напряжения в контактной сети повышается напряжение в первичной обмотке 6, а ток в обмотке управления 6 под действием БРН уменьшается. Это вызывает снижение постоянного магнитного потока в магнитных шунтах *1* и *3*,

замещению его переменным магнитным потоком. Вследствие этого в среднем магнитопроводе переменный магнитный поток уменьшается, что вызывает уменьшение ЭДС во вторичной обмотке *7*.

Катушки первичной обмотки и обмотки подмагничивания выполнены на каркасе из стеклопласта. Технические данные трансформатора ТРПШ приведены ниже:

Номинальная мощность, кВА 9,2
Номинальное первичное напряжение, В 380
Пределы колебания первичного напряжения, В 280–460
Среднее значение выпрямленного напряжения вторичной обмотки, В 55
Номинальный ток обмоток, А:
первичной 20
вторичной 80
подмагничивания 6,5
Частота питающего напряжения, Гц 50

19.17. Реакторы, фильтры и конденсаторы помехоподавления

При работе электровозов и электропоездов появляются радиопомехи. Причинами радиопомех являются: искрение под щетками машин постоянного тока, включение и отключение аппаратов, работа тиристоров и ряд других причин. Для снижения уровня радиопомех применяют реакторы, фильтры и конденсаторы помехоподавления. Реактор включают на ЭПС постоянного тока последовательно в цепь между токоприемником и быстродействующим выключателем (БВ). За реактором, со стороны силовой цепи, подключают конденсатор через который высшие гармоники тягового тока замыкаются на корпус (землю), не проникая в контактную сеть и не создавая помех радиоприему. Конденсатор также снижает крутизну фронта атмосферного перенапряжения (например, удар молнии в контактную сеть), предотвращая межвитковое замыкание в обмотках электрических машин.

На ЭПС переменного тока реактор включают между токоприемником и главным выключателем, а также между первичной обмоткой тягового трансформатора и главным выключателем включают еще и фильтр.

Реактор помехоподавления (рис. 19.18, *а, б*) состоит из катушки *2*, намотанной из медной ленты, без стального сердечника. Ее укрепляют либо на фарфоровом изоляторе *4*, применяя деревянные планки *1* и 3, либо на угольниках *5*.

Катушку реактора Д-51 наматывают плашмя и пропитывают в лаке ПЭ-933, а реактора ДР-027Т — на узкое ребро. Реакторы

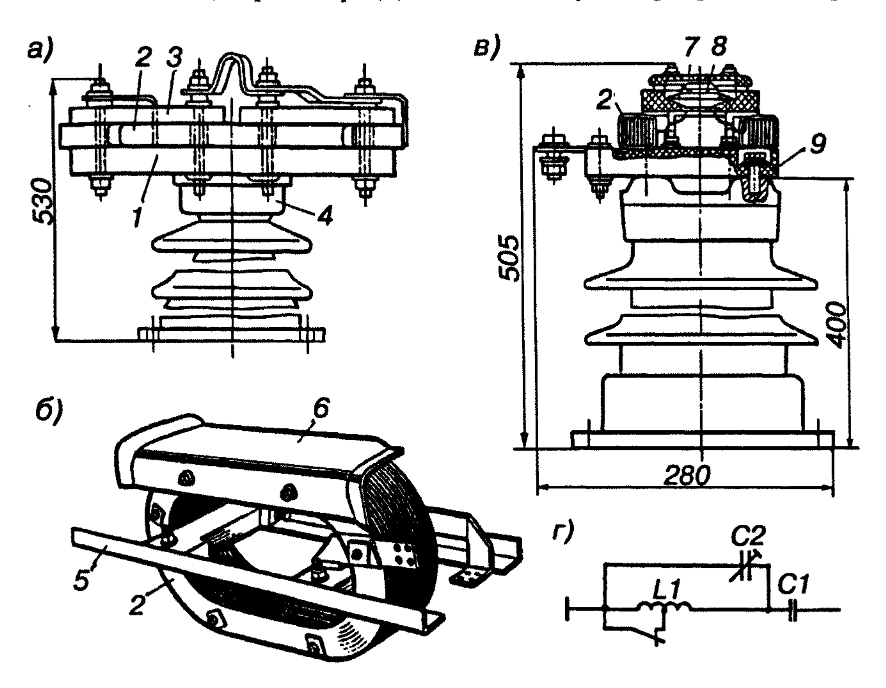


Рис. 19.18. Реактор помехоподавления Д-51 (а) *электровозов ВЛ80с, ВА80т и ВЛ80р, реактор Д-027Т(б) электровозов ВЛ10, ВЛ10у и ВЛ11, фильтр Ф-3(в) и схема его включения (г) электровозов ВЛ80с, ВЛ80р:*

1 *и* 3 — *планки;* 2 — *катушка,* 4 — *изолятор;* 5 — *угольник установочный;* 6 — *кожух стеклопластиковый;* 7 — *конденсатор постоянной емкости;* 8 — *конденсатор подстроечный;* 9 — *основание гетинаксовое*

выполняют с естественным воздушным охлаждением; они имеют практически постоянную, не зависящую от нагрузки индуктивность. Реакторы Д-51 устанавливают на крыше электровоза, ДР-027Т — на основании токоприемника.

На ЭПС постоянного тока применяют бумажно-слюдяные конденсаторы (КБГП-1-10 = 0,511 и др.), параметры которых выбирают в соответствии с уровнем радиопомех на ЭПС. Фильтр (рис. 19.18, *в, г*) электровозов переменного тока состоит из катушки *2* (*L1*), конденсатора *7* (*C1*) и подстроечного конденсатора *8* (*C2*), смонтированных на гетинаксовом основании 9, закрепленном на изоляторе. Катушка намотана из медной ленты ЛММ 2,63x8 мм плашмя без магнитопровода. Ее покровная изоляция выполнена из стеклоленты ЛЭС 0,25x25 мм, пропитанной в компаунде, а витковая — из электронита.

Контрольные вопросы

1. Какое устройство называется реактором?
2. Каково назначение сглаживающего реактора?
3. Какую функцию выполняет переходной реактор?
4. Как работает индуктивный шунт?
5. Каково назначение и устройство индуктивного датчика?
6. Каково отличие магнитного усилителя без обратной связи от аммлистата?
7. Как работает амплистат?
8. Каково назначение и устройство трансформатора ТРПШ?
9. Какие применяют устройства для подавления радиопомех?

Раздел 4.

АККУМУЛЯТОРНЫЕ БАТАРЕИ ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Глава 20.

Назначение и принцип действия аккумуляторов

20.1. Назначение и классификация аккумуляторов

Аккумуляторами называют химические источники электрической энергии многоразового действия, которые накапливают электрическую энергию при пропускании через них электрического тока и затем отдают ее при подключении к ним внешней нагрузки.

Аккумуляторные батареи электровозов и электропоездов предназначены для питания цепей управления, освещения и сигнализации при опущенном токоприемнике, а также для поднятия токоприемника .

Аккумуляторные батареи тепловозов и дизель-поездов предназначены для питания током генераторов или стартер-генераторов при пуске дизелей, а также для питания цепей управления и освещения при неработающем дизеле.

В ТПС применяют кислотные (свинцовые) и щелочные никель-железные и никель-кадмиевые аккумуляторные батареи, отличающиеся друг от друга материалом пластин и составом электролита.

20.2. Принцип действия аккумуляторов

20.2.1. Кислотный аккумулятор

Простейший кислотный аккумулятор состоит из сосуда с водным раствором электролита (серной кислоты H_2SO_4), в который погружены два электрода (положительный и отрицательный).

Принцип действия аккумуляторов основан на преобра-зовании электрической энергии в химическую при пропускании тока через аккумулятор (режим зарядки), а затем химической энергии в электрическую (режим разрядки).

В кислотных аккумуляторах активной массой положительных пластин служит перекись (двуокись) свинца (PbO_2) темнокоричневого цвета, а отрицательных — губчатый (чистый) свинец (Pb) серого цвета. При разрядке ток внутри элемента протекает от отрицательной пластины к положительной, активная масса переходит в сернокислый свинец, на что расходуется серная кислота. Вследствии этого плотность электролита снижается. При заряде протекает обратный процесс. Это можно описать уравнением химической реакции

$$Pb + PbO_2 + H_2SO_4 \Leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2SO_4$$

или более подробно

$$Pb + PbO_2 + 4H^+ + 2SO_4^2 \Leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2SO_4$$

Из курса химии известно, что раствор кислоты в воде распадается на ионы — положительно заряженные (катионы) и отрицательно заряженные (анионы). Катионы (H^+) под действием приложенного напряжения движутся к отрицательному электроду, а анионы (SO_4) — к положительному. Часть электронов с атомов положительных электродных пластин переходит в раствор электролита в результате чего на пластинах накапливается электрический потенциал до плюс 1,7 В; часть электронов атомов из раствора электролита переходит на отрицательные пластины, вследствии чего на них накапливается потенциал до минус 0,35 В. Величина ЭДС одного элемента заряженного кислотного аккумулятора составляет 2,04–2,1 В. При разрядке происходит обратный процесс.

20.2.2. Щелочной аккумулятор

Щелочные аккумуляторы применяются двух типов: никель-железные и никель-кадмиевые. В качестве положительных пластин используют гидроксид никеля (NiOH). Отрицательные

пластины состоят из кадмия, железа и их оксидов. Эти электроды опущены в электролит, состоящий из раствора едкого калия (КОН) или едкого натра (NaOH) .Чаще всего — это 20-процентный раствор КОН в дистилированной воде с добавлением 20г/л гидроксида лития (LiOH), плотностью 1,28 г/см^3, увеличивающего срок службы.

Химические реакции зарядки и разрядки никель-железного аккумулятора описывается уравнением

$$3Fe + 4NiOH + 4OH == Fe_3O_4 + 4Ni(OH)_2$$

или

$$Fe + Ni_2O_3 + 3H_2O == Fe(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$$

При зарядке потенциал на пластинах повышается до 1,7 В. Разряд допускают до 1,0В. При дальнейшей разрядке происходит деформация и повреждение пластин.

20.3. Параметры аккумуляторов

Основными параметрами аккумуляторов являются емкость, ампер-часовая отдача, ватт-часовая отдача или КПД, величина ЭДС и напряжения

Емкостью аккумулятора называется количество электричества, которое можно получить от полностью заряженного аккумулятора при разряде до минимально допустимого напряжения на зажимах. Емкость измеряется в ампер-часах (Агч), т.е. равна произведению разрядного тока на время разрядки. Чем больше поверхность соприкосновения пластины с электролитом, тем больше емкость. Поэтому пластины делают пористыми. На емкость влияет количество пластин, плотность (концентрация) и температура электролита, а также значение разрядного тока.

Аккумулятор при зарядке всегда потребляет больше энергии чем отдает. Часть энергии расходуется на зарядку аккумулятора, часть — на протекание химической реакции и еще часть преобразуется в теплоту. То же происходит и при разрядке. Величины, характеризующие степень использования количества

электричества и энергии (выраженное в процентах), назывется *отдачей аккумулятора.*

Значение, показывающее степень использования количества электричества, называется *ампер-часовой отдачей.*

Значение, показывающее использование энергии называется *ватт-часовой отдачей или КПД аккумулятора.*

Для кислотных аккумуляторов ампер-часовая отдача составляет 80–85%, а для щелочных — 60–70%.

Важнейшим параметром аккумуляторов является плотность его электролита, но об этом подробнее в следующей главе.

Напряжение, ЭДС кислотного аккумуляторного элемента, независимо от его размера, составляет 2–2,1 В (при одинаковой плотности электролита). При увеличении плотности электролита ЭДС элемента возрастает. Следует отметить, что чрезмерное повышение плотности электролита снижает срок службы аккумулятора. При нагрузке ЭДС всегда больше напряжения. Эти величины одинаковы только при холостом ходе — разомкнутой цепи.

ЭДС щелочного аккумулятора составляет 1,45 В. При полной зарядке щелочного аккумулятора ЭДС достигает 1,83 В. При разрядке вначале напряжение быстро падает до 1,3 В, а затем медленно снижается до 1,1 В. При таком напряжении разряд прекращают.

20.4. Типы аккумуляторов, применяемых в ТПС

В ТПС применяют кислотные и щелочные аккумуляторы, которые соединяют в аккумуляторные батареи.

В тепловозах и дизель-поездах применяют аккумуляторы:

свинцово-кислотные: 32ТН-450У2, 48ТН-450У2, 48ТН-35У2 и др.;

щелочные: 46ТПНЖ-550У2, 46ТПНК-550Т2 и др.

В электровозах и электропоездах в настоящее время в основном применяют щелочные аккумуляторные батареи: 90НК-55, 42НК-125, НКТ-160 и др.

Цифры и буквы входящие в обозначение аккумуляторов характеризуют следующие технические данные:

32,46,48,90,42 -первые две цифры — количество последовательно соединенных аккумуляторов в батарею;

Т — тепловозный,

П — пусковой;

Н — способ нанесения на свинцовую решетку рабоче-го вещества — намазные;

НЖ — никель-железные;

НК — никель-кадмиевые;

У — климатическое исполнение — для умеренного климата;

Т — тропическое исполнение;

250,450,550,125, 160 — номинальная емкость входящих в батарею аккумуляторов;

Последняя цифра 2 — размещение в шкафу, кожухе.

20.5. Сравнение технических данных кислотных и щелочных аккумуляторов

Как кислотные так и щелочные аккумуляторы имеют преимущества и недостатки.

Преимущества кислотных аккумуляторов перед щелочными: при одинаковой емкости они имеют меньшую массу, большую ампер-часовую отдачу, большую стойкость к низким температурам, в 1,5 раза большее напряжение на одном элементе, а следовательно и большую удельную емкость, можно по плотности электролита судить о степени разрядки. Зарядный ток составляет 10% емкости кислотного аккумулятора, против 25% у щелочного.

Преимущества щелочных аккумуляторов перед кислотными: увеличенный срок службы (шесть — семь лет, вместо двух — трех у кислотных), для изготовления используют менее дефицитные материалы; меньший саморазряд; большая механическая прочность и малая чувствительность к перезаряду и недозаряду, а также к большим разрядным токам. Большие зарядные токи кислотных аккумуляторов вызывают осыпание пластин. Щелочные аккумуляторы не содержат вредного для здоровья свинца и более стойки к динамическим воздействиям.

Контрольные вопросы

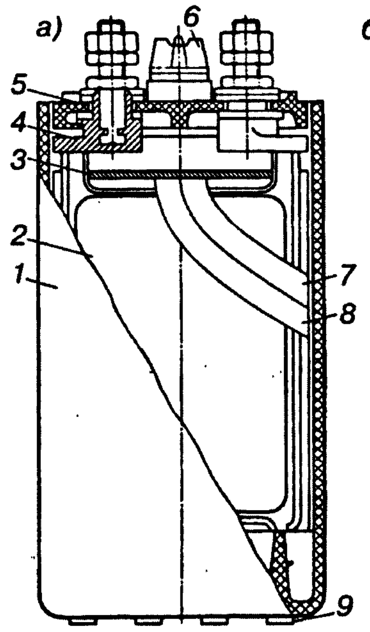
1. Каково назиачение аккумуляторов на тепловозах ? на электровозах ?
2. Какие виды аккумуляторов применяют в ТПС ?
3. Объясните принцип действия кислотиого или щелочного аккумулятора.
4. Назовите основные параметры аккумуляторов.
5. Что означают термины «емкость аккумулятора»? «ампер-часовая отдача»? «ватт-часовая отдача»?
6. Каковы достоинства и недостатки кислотных и щелочных аккумуляторов?

Глава 21.

Конструктивные решения аккумуляторов на тяговом составе

21.1. Устройство кислотного аккумулятора

В качестве примера рассмотрим устройство свинцово-кислотного аккумулятора ТН-450. На рис. 21.1, *а* показан элемент аккумулятора в разрезе. Отрицательные пластины представляют собой литые решетки из сплава свинца (95%) и сурьмы (5%).



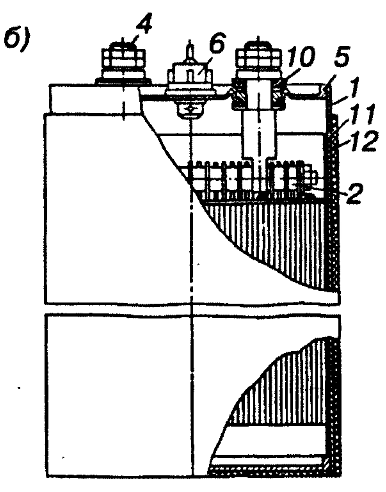


Рис. 21.1. Элементы тепловозной аккумуляторной батарей:

а — кислотной: 1 — корпус; 2 — полублоки положительных и отрицательных пластин; 3 — щиток; 4 — боры (вывод); 5 — крышка; 6 — пробка; 7, 8 — сепараторы; 9 — резиновые амортизационные полосы;
б — щелочной: 1 — стальной бак; 2 — полублоки положительных и отрицательных пластин; 4 — вывод; 5 — крышка; 6 — пробка; 10 — резиновые кольца; 11 — винипластовая пленка; 12 — резиновый чехол

Сурьма упрочняет свинцовые решетки. Решетки заполнены (намазыванием) чистым губчатым свинцом (PbO_2). Таким образом новый аккумулятор в исходном состоянии является заряженным. Положительные и отрицательные пластины объединены в отдельные полублоки. Отрицательный полублок содержит 20 пластин, а положительный — 19. Отрицательные и положительные пластины разделены сепараторами *7* и *8* из ребристого мипласта и стекловолокна. Полублоки положительных и отрицательных пластин помещают в эбонитовый бак *1*. Пластины опираются на четыре специальных выступа, выполненных на дне бака. В качестве ножек бака наклеены четыре резиновые амортизационные полосы *9*. Сверху бак закрыт эбонитовой крышкой *5* с четырьмя отверстиями для прохода выводов (борнов) от блоков пластин. В центре выполнено пятое отверстие для заливки электролита. Это отверстие закрыто пробкой *6* с вертикальными и горизонтальными каналами, с отражательным щитком и соединенные с атмосферой для выхода газов. Щиток предотвращает выплескивание электролита, особенно при движениии поезда. Крышка по периметру бака уплотнена резиновой кольцевой прокладкой с последующей заливкой мастикой. Резиновая прокладка и мастика — кислотостойкие. В местах прохода выводов из крышки, помещены резиновые кольцевые прокладки.

Электролитом служит раствор серной кислоты (H_2SO_4) в дистилированной воде. Плотность электролита для южных районов должна быть 1,24–1,25 г/см^3; в остальных районах — 1,24–1,25 г/см^3 в летнее время и 1,26–1,27 г/см^3 в зимнее.

21.2. Устройство щелочного аккумулятора

Щелочной аккумулятор состоит из стального корпуса *1* (рис. 21.1, *б*), в котором расположены полублоки 2, состоящий из положительных и отрицательных пластин. Каждый полублок имеет вывод в виде шпильки. Активная масса пластин помещается в пакетах с большим числом малых верстий, через которые протекает электролит. Для улучшения контакта к активной массе добавляют проводящий материал (чешуйчатый графит). Положительные и отрицательные плас-

тины изолированы друг от друга эбонитовыми палочками. На выводных шпильках в местах выхода из корпуса надеты изоляционные втулки. На каждый элемент надет резиновый чехол. Заливают электролит через отверстие, расположенное между выводами, закрываемое пробкой *6*.

Особенности конструкции тепловозного щелочного аккумулятора

Принципиального отличия конструкций электровозных и тепловозных аккумуляторов нет. Как правило, тепловозные аккумуляторы имеют бульшую емкость, чем электровозные, поэтому элементы аккумуляторов имеют бульшие размеры. Для уменьшения внутреннего сопротивления и для удобства соединения элементов аккумуляторов в батарею каждый элемент имеет не два, как у электровозных, а четыре вывода.

21.3. Электролит

В щелочных аккумуляторах работающих при температуре воздуха от –19 до +35°C, применяют составной электролит калиево-литиевый, плотностью 1,19–1,21 г/см³, который состоит из раствора едкого кали с добавкой на 1л раствора 20 г аккуму- ляторного едкого лития (моногидрата лития). При температуре воздуха от –20 до –40°C применяют раствор едкого кали плотностью 1,26–1,28 г/см³ без добавления едкого лития, а при температуре от +10 до +50°C — составной электролит плотностью 1,17–1,19 г/см³, состоящий из раствора едкого натра с добавкой едкого лития 15–20 г на 1 л раствора.

Электролит для щелочных аккумуляторов приготавливают в стальной сварной посуде. Запрещается пользоваться посудой оцинкованной, луженой, свинцовой и керамической.

21.4. Соединение элементов в батарею

На тепловозах аккумуляторные батареи размещают, как правило, в специальных ячейках под главной рамой по обе стороны топливного бака или по торцам тепловоза; на

маневровых тепловозах — в специальном отсеке за кабиной машиниста.

При монтаже аккумуляторов в батарею элементы устанавливают плотно один к другому и закрепляют от перемещения. Схемы соединения тепловозных аккумуляторов показаны на рис. 21.2. Перемычки для соединения аккумуляторов в батарею выполняют из меди. В кислотных аккумуляторах медные перемычки покрывают свинцом

На электровозах аккумуляторные батареи располагают либо в кузове, либо под рамой между тележками по обе стороны кузова. Аккумуляторная батарея электровозов ВЛ80^т, ВЛ80^с, типа 42НК-125, состоит из 42 никель-кадмиевых акку-муляторов,установленных в двух металлических ящиках, которые расположены под рамой по обе стороны каждой секции. В каждом ящике на тележке установлен 21 аккумулятор. На дне тележки уложены диски, окрашенные щелочестойкой эмалью и имеющие вырезы для стока электролита в случае его выплескивания. Тележка и дно ящика имеют отверстия для стока электролита. При обслуживании батареи крышка открывается до

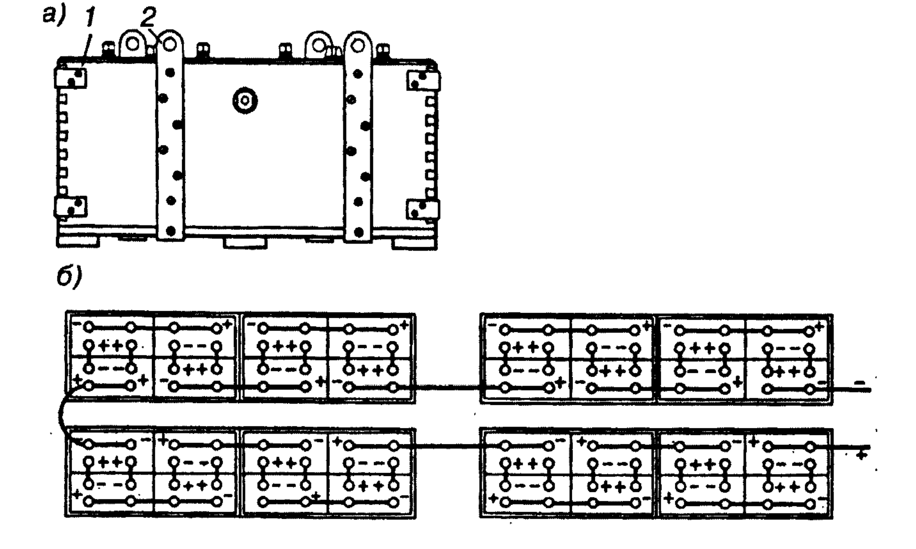


Рис. 21.2. Тепловозная кислотная аккумуляторная батарея:
а — секция; б — схема соединения элементов в батарее 32ТН-450

горизонтального положения и удерживается в таком положении тросами, связанными с крышкой регулировочными болтами. В закрытом положении крышка крепится к ящику: вверху — тремя болтами, сбоку — двумя откидными замками.

21.5. Требования техники безопасности при обслуживании аккумуляторных батарей

При зарядке аккумуляторых батарей выделяется водород, который при определенной концентрации в воздухе образует гремучую смесь. Поэтому в аккумуляторном отделении запрещается курение, применение открытого огня, а также использование электрооборудования, способного вызвать искрение.

При работе с кислотами, щелочами, электролитами обслуживающий персонал обязан пользоваться защитными средствами и спецодеждой. Кроме того, пары серной кислоты обжигают и раздражают слизистые оболочки верхних дыхательных путей и глаза. Щелочи при попадании на открытые части тела вызывают сильные ожоги. Поэтому следует подробно изучить и строго соблюдать требования инструкций по технике безопасности.

Контрольные вопросы

1. Для чего в состав сплава отрицательных пластин кислотных аккумуляторов добавляют сурьму?
2. Что представляет собой борн?
3. Какова плотность электролита щелочного аккумулятора зимой и летом?
4. Какова плотность электролита кислотного аккумулятора зимой и летом?
5. Какое вредное воздействие оказывают пары кислот на человеческий организм?
6. Какие средства защиты применяют при обслуживании аккумуляторных батарей?

Приложение 1

Технические данные генераторов тепловозов

Показатель	МПТ 99/47А	ГП-300БУ	ГП-311БУ	ГП-311ВУ	ГП-312У
Серия тепловоза	ТЭЗ, ТЭ7	ТЭМ2, ТЭМ2М	2ТЭ10Л, 2ТЭ10В, 3ТЭ10М, 4ТЭ10С	ТЭП60	М62, 2М62
Охлажденне	Самовентиляция		Незавнсимое		
Номинальная мощность, кВт	1350	780	2000	2000	1270
Ток, А, при иапряженни:					
иизшем	2460	1210	4320	4320	3570,
высшем	1650	900	2870	3150	2230
Напряжение, В:					
низшее	550	645	465	465	356
высшее	820	870	700	635	570
Обмотка якоря	Лягушачья	Петлевая	Петлевая двухходовая		
Число полюсов:					
главиых	8	8	10	10	10
добавочиых	8	8	10	10	10
Воздушиый зазор полюсов, мм:					
главиых	5	4	5	4	3,5
добавочных	9	9	13,5	14	9,5
Чнсло пластин коллектора	444	380	465	465	444
Масса, кг	7460	4800	8700	9000	7400

Приложение 2

Технические данные тяговых электродвигателей электровозов переменного тока

Показатель	НБ-412К	НБ-418К6	НБ-514	НБ-420Б
Серия электровоза	ВЛ60^{к}, ВЛ60^{п}	ВЛ80^{к}, ВЛ80^{т}, ВЛ80^{с}, ВЛ80^{р}	ВЛ85	ВЛ82
Напряжеиие иа зажимах двигателя, В:				
иомииальиое	1600	950	1000	3000/2
максимальиое	1850	1180	1180	3850/2
Максимальиая частота вращеиия, об/мии	1680	2040	2040	2030
Число пар полюсов	6	6	6	4
Коэффициеит возбуждения, %				
иомииальный	95	96	98	96
миимальный	46	43	48	32
Часовой режим				
Мощность, кВт	775	790	850/830	700
Ток якоря, А	515	880	905/880	500
Ток возбуждеиия, А	490	845	887	480
Частота вращения, об/мин	850	890	905/915	905
Частота тока в якоре , Гц	42,5	44,5	45,25	30,17
Момеит на валу, Н м	8711	8486	8975/866	7390
КПД иа валу, %	93,4	94,45	94,22/94,3	93,2

Показатель	НБ-412К	НБ-418К6	НБ-514	НБ-420Б
Продолжительный режим				
Мощиость иа валу, кВт	675	740	795/775	635
Ток якоря, А	450	820	843/820	450
Ток возбуждения, А	429	785	825	433
Частота вращения, об/мин	890	915	925/935	935
Частота тока в якоре, Гц	—	45,75	46,25	—
Момеит иа валу, Нм	7247	7730	8212/7917	6489
КПД на валу, %	94,0	94,8	94,47/94,57	94,0
Общее сопротивление обмоток двигателя, Ом, при температуре:				
+20°С	0,0880	0,0317	0,0315	0,0923
+15°С	0,1222	0,04375	0,04317	0,1275
Отиошение тока продолжнтельного режима к току часового режима	0,87	0,93	0,93	0,9
Масса двигателя иа 1 кВт мощностн, кг/кВт, в режиме:				
часовом	6,26	5,51	5,04	6,43
продолжнтельном	7,19	5,88	5,39	7,01
Отношение массы двигателя к вращающему моменту, кг/(Нм), в режнме;				
часовом	0,56	0,51	0,477	0,61
продолжительиом	0,67	0,56	0,52	0,69

Приложение 3

Таблица 3.1 **Технические данные вспомогательных машин**

Электрическая машина	Тип	Род тока	Мощность, кВт	Напряжение, В	Ток, А (продолжительиый)
		Двухмашинные агрегаты			
Подвозбудитель	ГС500	Перемеииый	0,55	120	10
Тахогеиератор	ТГ83/35	Постояииый	0,12	24	5
Возбудитель	В600	»	22,5	180	125
Вспомогательиый генератор	ВГТ275/150	»	12	75	160
Возбудитель	МВТ 25/9	»	5,6	75	75
Вспомогательиый генератор	МВТ 25/11	»	5,75	75	
Возбудитель	ВТ275/120	»	10	107	95
Вспомогательный генератор	ВГТ275/150	»	8	75	106
Возбудитель	ВС650ВУ2	Перемеиный	26	287	3300
Подвозбудитель	ВС652У2	»	0,55	110	10
Стартер-геиератор*	ПСГУ2	Постояниый	50	110	455
		Электродвигатели			
Привода компрессора	2П2К02	»	37	11	400
Привода маслопрокачивающего насоса	П41	»	4,2	64	84
Привода топливоподкачивающего иасоса	П21М	»	0,5	75	9,6
Вентилятора кузова	П11М	»	0,29	110	4,06
Привода маслопрокачивающего иасоса	ПНЖ132М02	»	4,0	64	81
Веитилятора кузова	ПНЖ90М02	»	0,25	75	5,3
Осевого веитилятора	АМВ37-03	Перемеииый	37	400	56
Холодильной камеры	АМВ-75	»	75	400	—
Вентилятора охлаждеиия тяговых двигателей	А2-82-6-100 4АЖ225М602	» »	24 45	400 400	48 72
Веитилятора охлаждеиия выпрямительиой устаиовки	АОС-2-62-6-100	»	8	400	19,5

* Максимальный кратковременный ток 1600 А.

Частота вращения (максима-льиая), об/мнн	К.п.д. (мак-сима-льный, %	Масса, кг	Класс изоляции обмоток	Серии тепловоза
4000	52,5			2ТЭ10Л, ТЭП10
		85	В	
	—			
1800	82,5 75	660	В	ТЭП60, М62, 2ТЭ10Л, 2ТЭ10В, 4ТЭ10С
				3ТЭ10М
	74 75	400	В	ТЭМ1, ТЭМ2 ТЭМ3
146	1800	660	В	ТЭ3, ТЭ7
	75	355	В	2ТЭ116, ТЭП70, ТЭМ7
4000	52,5	67,5	В	2ТЭ10Л,2ТЭ10В,4ТЭ10С, ТЭП60, М62
3300	72	800	В	2ТЭ116, ТЭП70, ТЭМ7
1450	84	550	—	2ТЭ116, 2ТЭ121
2200	78	78	В	2ТЭ10Л,2ТЭ10В
1350	71,7	37,8	В	2ТЭ10Л,2ТЭ10В
1500	65	18,5	В	2ТЭ116
2200	77	86	—	2ТЭК.В, 3ТЭ10М
1500	62,7	26	—	2ТЭ10В, 3ТЭЮМ
2000	89	223	Н	2ТЭ116
1200	90	280	Н	2ТЭ116.2ТЭ121
1970 2000	91 90	269 355	Н Н	2ТЭ116 2ТЭ116, 2ТЭ12
2000	76	173	Н	2ТЭ116, 2ТЭ121

Таблица 3.2.

Частота враще-ния, об/мин	КПД (максн-мальный), %	Масса, кг	Давление, кПа / Расход охлаждающего воздуха, $м^3/с$	Серня тепловоза
1000	95,8	6000	1,5/4,45	2ТЭ116, ТЭП70
1000	95,8	5200	1,2/2,8	ТЭМ7, ТЭМ8
1000	91,0	8200	2,0/7,5	2ТЭ121

Таблица 3.3

Электрнческая машина	Тнп	Мощность, кВт	Напряже-нне, В	Ток, А	
				при напря-женни	максимальный, кратко-временный
Синхронные генераторы					
Тяговый гене-ратор	ГС-501АУ1	2800	360/580	2×2400 / 2×1500	2×3700
Тяговый ге-нератор	ГС-515У2	1400	175/280	2×2500 / 2×1540	2×3500
Тяговый агрегат					
Тяговый гене-ратор		2800	366/580	2×2400 / 2×1520	2×3400
Вспомогатель-ный генератор	А-714УХЛ	630	400	2×570	2×850

Приложение 4

Основные параметры тепловозов с асинхронными тяговыми двигателями

Таблица 4.1

Серия тепловоза / Техннческне параметры	HAWK	DE2500	Am6/6	EDE1000500	DE501	MEC502	DE500	SSB	DE1002	Di4	ME
Год нзготовления	1965	1971	1976	1977	1980	1980	1981	1981	1981	1981	1981
Заказчик	BR	DB	SBB	DB	DB	DB	DB	OB	DB	NSB	DSB
Чнсло секций	1	3	6	6	20	1	20	1	16	5	37
Род службы	макет	опыт	маневр	маневр	маневр	опыт	маневр	маневр	маневр	магистр	магистр
Изготовление электрической части	Brush	BBC	BBC	BBC	BBC	BBC	Siemens	Siemns	BBC	BBC	BBC
Изготовленне механической части	Brush	Henschel	Henschel	Henschel	Krupp	Krupp	Kaelbe		MaK	Henschel	Henschel
Изготовленне дизеля		Henschel	CIA		MTU	MTU			MVAf	GM	GM
Осевая формула	Bo-Bo	Co-Co	Co-Co	Bo-Bo	Co	Co	Co	Bo-Bo	Bo-Bo	Co-Co	Co-Co
Осевая нагрузка, тс	20	13,3	18,5	25	20	22	20	12,5	22	18,8	19,3
Сцепной вес, тс	80	80	111	100	60	66	60	45	80	113	116
Мощность по дизелю, кВт	1100	1840	1840	475	500	SOO	500	500	1320	2800	2800
Мощность по генератору, кВт			1725		470						
Скорость максимальная, км/ч	120	140	85	40	45	80	50	65	70	140	160
Скорость минимальная, км/ч		20	13,5	5	7	10	7		14	20	20
Сила тяги максмальная, кН	220	270	400	330	250	275	225	145	340	360	360

Продолжение табл. 4.1

Технические параметры / Серия тепловоза	E461	ME05	EDE700	D145	DE1003	Dr16	ME07	311
Год изготовления	1981	1981	1981	1983	1984	1985	1986	1986
Заказчик	DB		DB	FS	DB	VR	TCDD	RENFE
Число секций	5		5	62	4	2	40	61
Род службы	маневр	маневр	маневр	маневр	маневр	опыт	маневр	маневр
Изготовление электрической части	Siemens	BBC	Siemens	BBC	BBC	Strumberg	BBC	Siemens
Изготовление механической части	LHB	KM		FIAT	MaK	Vaime	KM	MTM
Изготовление дизеля		MTU			MVVM	Pielslick	MTU	MTU
Осевая формула	Co	Co	Co	Bo-Bo	Bo-Bo		Bo-Bo	Bo-Bo
Осевая нагрузка, тс	21,7	25	20	17,5	22	20	20	20
Сцепной вес, тс	65	75	60	70	88		80	80
Мощность по дизелю, кВт	700	500	70	850	2X510	1670	785	785
Мощность по генератору, кВт								554
Скорость максимальная, км/ч	60	60	50	100	80	140	80	90
Скорость минимальная, км/ч		7		10	14		8	7
Сила тяги максимальная, кН	242	250	140	250	340	270	255	260

Продолжение табл. 4.1

Серия тепловоза / Технические параметры	HAWK	DE2500	Am6/6	EDE1000/500	DE501	MEC502	DE500	SSB	DE1002	Di4	ME
Структура тягового преобразователя											
Соединение обмоток генератора		Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Тип входного преобразователя		НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	УВ	НВ	НВ	НВ	НВ
Тип фильтра 1		C	C	C	C	C	L	LC	C	C	C
Тип промежуточного преобразователя								ИППН			
Тип фильтра 2								L		4	
Тип выходного преобразователя		АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИТ	АИТ	АИН	ЛИН	ЛИН
Тип полупроводниковых приборов	ТН	ТН	ТН	ТН	ТН	ТН	ТН	ТН	ТН	ТН	ТН
Напряжение промежуточного звена, В		1500	1500	1500	1000				1400	1400	1400

Окончание табл. 4.1

Серия тепловоза / Технические параметры	E461	ME05	EDE700	D145	DE1003	Dr16	ME07	311
Структура тягового преобразователя								
Соедииение обмоток генератора	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
Тип входного преобразователя	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	УВ
Тип фильтра 1	LC	C	C	C	C	C	C	L
Тип промежуточиого преобразователя	ИППН							
Тип фильтра 2	L							
Тип выходиого преобразователя	АИТ	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИТ
Тип полупроводииковых приборов	ТН	ТН	ТН	ТН	GTO	GTO	ТН	ТН
Напряжение промежуточиого звена, В	0–900						1400	0—1100

Таблица 4.2

Серия тепловоза / Технические параметры	EMD268	DE6400	F69PH AC	DE1024	SD60M AC	EDE1600	ME10	38
Год изготовления	1987	1988	1988	1990	1990	1991	1992	1992
Заказчик	EMD	NS	Amtrak	D8	BN	DB	RAJ	SPOOR
Число секций	1	120	2	3	4	2	10	50
Род службы	опыт	маневр	магистр	магистр	магистр	маневр	маненр	магистр
Изготовление электрической части	Siemens	ABB	Siemens	ABB	Siemens	Siemens	ABB	Siemens
Изготовление механической части	GM	MaK	GM	KRUPP	GM	Henschel	KM	
Изготовление дизеля	GM	MTU	GM	MaK	GM	MWM	MTU	Calerpill
Осевая формула	Co-Co	Bo-Bo	Bo-Bo	Co-Co	Co-Co	Bo-Bo	Bo-Bo	Bo-Bo
Осевая нагрузка, тс	29,5	20	29,5	19,5	29,5	22	20	18,5
Сцепной вес, тс	177	80	118	117	177	88	80	74
Мощность по дизелю, кВт	2835	1180	2260	2650	2835	560	940	780
Мощность по генератору, кВт	2300		1915	2450	2500		856	
Скорость максимальная, км/ч	130	120	177	160	113	40	100	100
Скорость минимальная, км/ч		15		25		5	8	12,5
Сила тяги максимальная, кН	780	305	276	405	780	360	285	260

Продолжение табл. 4.2

Технические параметры \ Серия тепловоза	DF200	SD70M AC	SD80M AC	AC4400 CW	AC33C	SD90M AC	AC6000 CW	DE2000	DE30 AC	DM30 AC
Год изготовления	1992	1993	1995	1995	1996	1996	1996	1996	1997	1997
Заказчик	JNR	BN, CSX	CP, CON	CP, SP, U, P	PR	UP	UP, CSX	OSE	LIRR	LIRR
Число секций	4	560	48	748	30	210	238		23	18
Род службы	магистр	магистр	магистр	магистр	магистр	магистр	магистр	магистр	магистр	магистр
Изготовление электрической части	Hitachi	Siemens	Siemens	GE	GE	Siemens	GE	ADtranz	Siemens	Siemens
Изготовление механической части	Hitachi	GM	GM	GE	ADtranz	GM	GE	ADtranz	GM	CM
Изготовление дизеля	MTU	GM	GM	GE	GE	GM	GE	MTU	GM	GM
Осевая формула	Bo-Bo-Bo	Co-Co	Co-Co	Co-Co	Co-Co	Co-Co	Co-Co	Bo-Bo	Bo-Bo	Bo-Bo
Осевая нагрузка, тс	16	29.5	31,6	30	22	31,6			32	32
Сцепной вес, тс	96	177	190	180	132	190			128	128
Мощность по дизелю. кВт	2X1250	2985	3730	3282	2460	4476	4662	2100	2240	2240
Мощность по генератору, кВт		2500								
Скорость максимальная, км/ч	110	113	120	120	120	120	120	160	160	160
Скорость минимальная, км/ч		12			14	16	16			
Сила тяги максимальная, кН	328	780	820	800	517	890	800		360	360

Продолжение табл. 4.2

Серия тепловоза / Технические параметры	EMD268	DE6400	F69PH AC	DE1024	SD60M AC	EDE1600	ME10	38
Структура тягового преобразователя								
Соединение обмоток генератора	YY	Y	YY	Y	YY	Y	Y	Y
Тип входного преобразователя	УВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
Тип фильтра 1	L	C	C	C	C	C	C	C
Тип промежуточного преобразователя								
Тип фильтра 2								
Тип выходного преобразователя	АИТ	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН
Тип полупроводниковых прнборов	TH	TH	СТО	GTO	GTO	GTO	GTO	GTO
Напряжеиие промежуточного звена, В		1400		2800	2600	1200		2350

Окончание табл. 4.2

Серия тепловоза / Технические параметры	DF200	SD70 M AC	SD80 M AC	AC4400 CW	AC33C	SD90M AC	AC6000 CW	DE2000	DE30 AC	DM30 AC
Структура тягового преобразователя										
Соединение обмоток генератора	Y	YY	YY	Y	Y	YY	Y	Y	Y	Y
Тип входного преобразователя	Н В	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ	НВ
Тип фильтра 1	С	LC	С	С	С	С	С	С	С	С
Тип промежуточного преобразователя										
Тип фильтра 2										
Тип выходного преобразователя	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН	АИН
Тип полупроводниковых прнборов	GTO	GTO	GTO	GTO	GTO	GTO	GTO	GTO	GTO	GTO
Напряжение промежуточного звена, В		2600		1400	1400		1400			

Сокращения, прннятые в таблице:
Строка 2 — условное обозначение железных дорог: BR — Великобрнтаннн, DB — Германни, SBB — Швейцарнн, NSB — Норвегнн, DSB — Даннн, FS — Италин, VR — Финляндин, TCDD — Турции, RENFE—1 Испанин, RA1— Ирана, SPOOR—ЮАР, JNR—Японин, PR—Пакнстана, OSE—Греции, Amtrak, BN, CSX, CP, CON, SP, UP, LIRR—США. *Строка 14* — скорость выхода на гнперболическнй участок тяговой характеристики. *Строка 17* — У-одна трехфазная обмотка, YY-дае трехфазные обмотки. *Строка 18* — НВ-иеуправляемый выпрямнтель, УВ-управляемый выпрямитель. *Строка 20* — ИППН-импульсный прерыватель постоянного напряжения. *Строка 21* — АИН-автономный ннвертор напряжения с широтно-нмпульсной модуляцней, АИТ-автономный инвертор тока, прочерк означает отсутствне элемента. *Строка 23* — ТН-однооперацнонные тиристоры, GTO- запираемые тнри. *Пустая клетка означает отсутствие информации.*

Приложение 5

Технические данные сглаживающих реакторов

Таблица 5.1

Показатель	РЭД-4000А	РС-32	РС-53	РС-56	ЭРБД-800 / СР-800	1CLVII -7050 / 2CTVII-7050
Серия ЭПС	ВЛ60^к	ВЛ80^к	ВЛ80^с, ВЛ80^т, ВЛ80^р	ВЛ82^м	ЭР9 / ЭР9П, ЭР9М	ЧС4 / ЧС4^т
Ток часового режима, А	1575	1850	1850	535	— / 400	1149×3 / 1100×3
Индуктивность, мГн	5,6/10,5*	4/5,85*	1/6*	42/60*	3×3/—*	20**
Номинальное напряжение, В	3000	3000	1300	3000	3000	—
Площадь сечения сердечника, см^2	130	920	920	920	—	Нет
То же провода обмотки, мм	5×50	1×65	4×65	1,95×65	—	—
Число витков	144	70	70	228	168	—
Марка провода	МГМ	МГМ	МГМ	МГМ	ПСД-3,05-10	—
Количество охлаждающего воздуха, м^3/с	5	3	1,59	1	—	3,5/2,2
Масса реактора, кг	1570	800	800	1700	—	1300 / 1300
Число реакторов на электровозе или моторном вагоне	2	4	4	4	4	212

Таблица 5.2

Показатель	Пра-1М, Пра-2	Пра-3А	Пра-48
Серия электровоза	ВЛ6О^{к}	ВЛ80^{к}	ВЛ80^{т}, ВЛ80^{р}
Номиальное напряжение между выводами, В	252	146	146
Ток ветви, А, в режиме: часовом продолжительном	 1100 1000	 1350 1270	 1350 1270
Индуктивное сопротивление, Ом	0,26	0,12	0,12
Число витков	44	32	27
Площадь сечения шины, мм^2	6×60	8×60	8×60
Масса реактора, кг	580	572	450

Таблица 5.3

Показатель	Реактор типа			
	ДС-1	ДС-3	ДЗ-1	Д-101А
Серия ЭПС	ВЛ80, ВЛ80, ВЛ80^{р}	ВЛ80, ВЛ80, ВЛ80^{р}	ВЛ60, ВЛ80, ВЛ80^{с}	ЭР9
Номинальный ток, А	90	60	0,8	50
Индуктивность, мГн	12*		36 ± 6**	—
Активное сопротив-леиие при 20°С, Ом	0,0158 ± 5%	2,45***	60 ± 4	0,38
Допустимый ток в течение 10 с, А	375	250		—
Масса, кг	64	13,3	—	5,5

* При токе 30 А.
** При токе 0,125 А.
*** Переменному току 20 А частотой 50Гц.

Таблица 5.4.

Показатель	Индуктивный шунт типа			
	ИШ-2К	ИШ-95 L	Н-3554/41	ИШ-104А1
Серия ЭПС	ВЛ10, ВЛ10^{р} ВЛ11	ВЛ80^{к}, ВЛ80^{с} ВЛ80^{т}, ВЛ80^{р}	ЧС2^{т}	ЭР2
Номинальное напряжение, кВ	3	2	3	3
Ток, А	300	520	290	35
Индуктивность, мГн	16	1,5	9–18	240–3501*
Масса, кг	580	110	607	298

* При токе 50 А

Литература

1. Курбасов А.С. и д.р. Проектирование тяговых электродвигателей. Учебное пособие для вузов, М.: транспорт, 1987. —536 с.
2. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия, яисполнения для различных климатических районов, категорий условий эксплуатации, хранения, транспортировки в части воздействия климатических факторов внешней среды.
3. ГОСТ 15543-1-89. Изделия электротехнике. Общие требования в части стоимости к климатическим внешним воздействующим факторам.
4. ГОСТ 16350-80. Климат СССР. Районирование и статические параметры климатических факторов для технических целей
5. ГОСТ 12.0.003.-74ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы.Классификация (1.3)
6. ГОСТ 12.1.019-79ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты.
7. Правила по охране труда при техническом обслуживании и текущем ремонте ТПС и грузоподъемных кранов на железнодорожном ходу.
8. Правила электробезопасности для работников железнодорожного транспорта на электрофицированных железных дорогах. ЦЭ-346 ЦЗ А.Н. Кондратенко от 22.09.95
9. Тепловозы под редакцией В.Д.Кузмича М. Транспорт. 1991 — 325 с
10. Рудая К.И., Ложнова Е.Ю.Тепловозы. Электрическое оборудование и схемы М. : Транспорт 1997. 304 с.
11. Токарев Б.Ф. Электрические машины. М. :Энергоатомиздат 1989.
12. Костенко М.П. Пиотровский М.М.. Электрические машины т. 1. М., «Энергия» 1964 — 548с
13. Магистральные электровозы. Тяговые электрические машины / В.И. Бочарова, В.П. Янова — М.:Энергоатомиздат, 1992, — 464с
14. Тяговые электродвигатели электровозов. Под. ред. В.Г. Щербакова. Новочеркасск: Агентство Наутилус, 1998 — 654 с
15. Устройство и ремонт электровозов постоянного тока. М.: Транспорт, 1977— 464 с.

16. Нотик З.Х. Тепловозы ЧМЭЗ, ЧМЭЗт,ЧМЭЗэ. М.: Транспорт 1996 — 446 с.
17. Тепловоз 2ТЭ116. М.: Транспорт 1996 — 336 с.
18. Захарченко Д.Д,, Ротанов МЛ Тяговые электрические машины. М.: Транспорт 1991 — 344 с.
19. Электровоз ВЛ 80 с М.: Транспорт 1982 — 624 с.
20. ВольдекА.И. Электрические машины Л.: Энергия — 1978 — 832 с.
21. Калинин В.Н. Электровозы и электропоезда М.: Транспорт 1991 — 480 с.
22. Пиотровский Л.М. Элетрические машины Л.: Энергия — 1972 382 с.
23. Электрические машины, электрическое оборудование тепловозов — Справочник. М.: Транспорт 1981 — 265 с.
24. Гнездилов Б.В. и др. Коллекторно-щеточный узел тяговых электрических машин локомотивов М.: Транспорт 1971 — 159 с.
25. Электровоз ВЛ11 Руководство по эксплуатации М.: Транспорт 1983 — 464 с.
26. Винокуров ВА., Попов ДА Электрические машины железнодорожного транспорта М.: Транспорт 1992 512 с.
27. Китаев В.Е. и др. Электрические машины том 1. М.: Высшая школа 1978 — 184 с.
28. Хвостов В.С. Машины постоянного тока М.: Высшая школа 1988 — 336 с.
29. Морошкин Б.Н. Электрическое оборудование тепловоза ТЭП60 М.: Транспотр 1987 — 224 с.
30. Брускин Д.Э., Зорохорвич А.Е. Хвостов В.С. Электрические машины М.: Высшая школа 1979 — 288 с.
31. Верхогляд В.Е. и др. Электрооборудование тепловозов Справочник М,: Транспорт 1981
32. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины М.: Энергия 1980 — 928 с.
33. Туровский Я.Б. Техническая электродинамика М.: Энергия 1974 — 968 с.
34. Вентильные двигатели и их применение на подвижном составе /Тихменев Б.Н,, Горин Н.Н., Кучумов ВА. и др./ М.: Транспорт 1976 — 280 с.
35. ГОСТ 183-74. Машины электрические вращающиеся. Общие технические требования.

36. ГОСТ 7217-87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.
37. Кацман М.М. Электрические машины. М.:, Высшая школа, 1990. с 464
38. Цукало П.В., Ерошкин Н.Г. Электропоезда ЭР-2 и ЭР-2Р. М.:, Транспорт, 1986, с 360
39. Быстрицкий Х.Я., Дубровский З.М., Ребрик Б.Н. Устройство и работа электровозов переменного тока. М.:, Транспорт, 1973, с 464
40. Дубровский З.М., Попов В.И., Тушканов Б.А. Грузовые электровозы переменного тока. М.: Транспорт, 1998.

Содержание

А.А. Дайлидко

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
ТЯГОВОГО ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
Учебник

Редактор *Г.В. Тимченко*

Компьютерная вёрстка *Г.Д. Волковой*

ИД № 01842 от 22.05.2000. Подписаио в печать 10.11.00.
Зак. 1254. Формат 60×80 $^1/_{16}$. Усл. печ. л. 25,25. Тираж 2500 экз.

Москва, Басманиый переулок, 6
ИПК «Желдориздат»
Отпечатаио в типографии РГОТУПС
107078, Москва, Басмаиный переулок, 6